INVESTIGACION y CIENCIA

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

VIDA EN EL UNIVERSO

Steven Weinberg

James Peebles

Robert Kirschner

Stephen H. Schneider

Leslie E. Orgel

Stephen Jay Gould

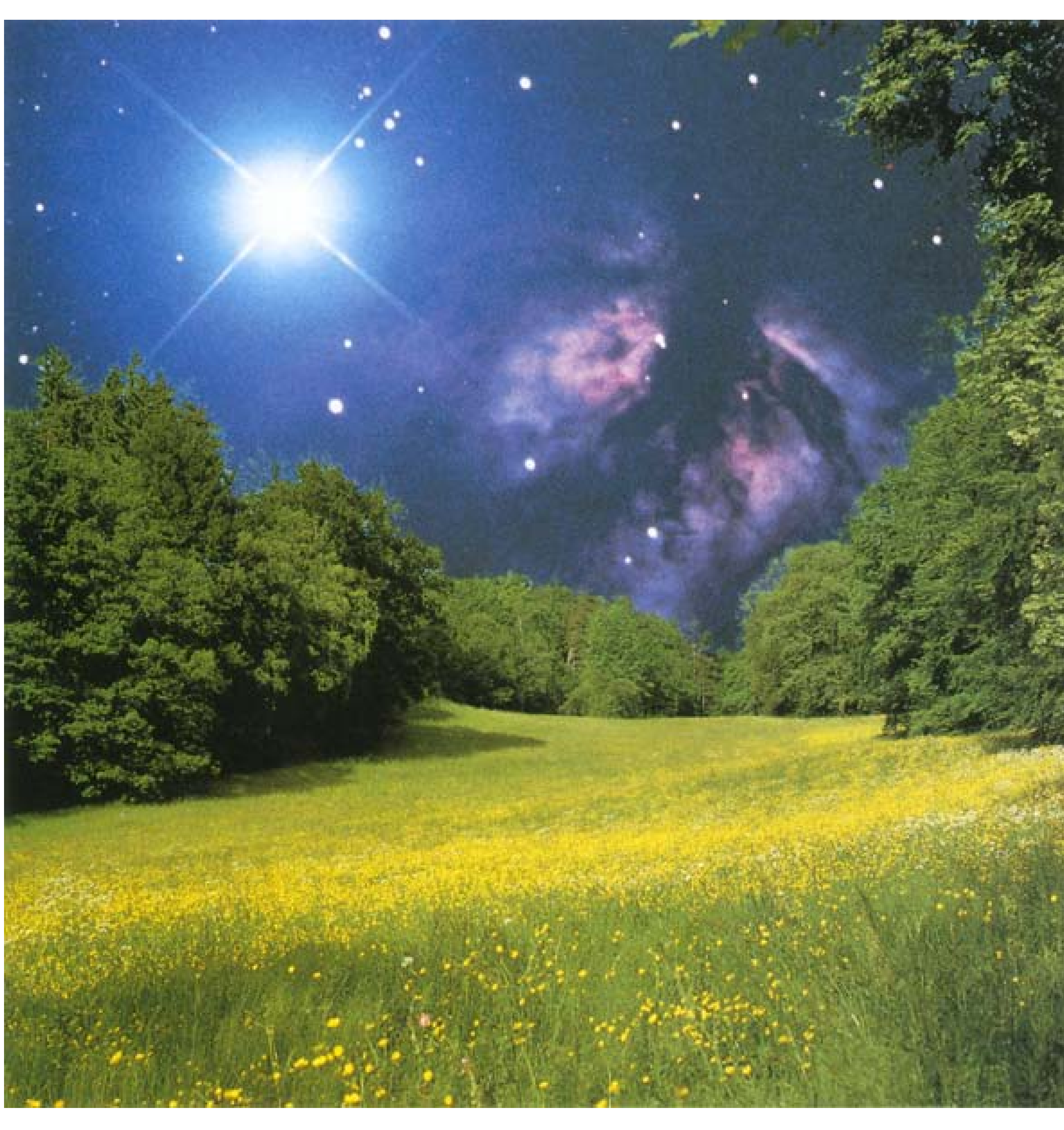
Carl Sagan

Robert D. Martin

William H. Calvin

Marvin Minsky

Robert Kates



DICIEMBRE 1994
700 PTAS.



Diciembre de 1994 Número 219



Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN 150 YEARS OF INNOVATION

SECCIONES

PROCEDENCIA DE LAS ILUSTRACIONES

Portada de Jack Newton/ZEFA y Pigneter/MAURITIUS

Página	Fuente
6-7	Alfred T. Kamajian
8-9	Tomo Narashima
10-11	Jana Brenning
12	Alan Dressler, Inst. Carnegie/NASA
14	NASA (*izda.*), George Retseck (*dcha.*)
16	Johnny Johnson (basado en material original de M. Strauss, Instituto de Estudios Avanzados/NASA)
18-19	Johnny Johnson (basado en material original de Pat McCarthy, Inst. Carnegie) (*arriba*), George Retseck (*abajo*)
20-22	J. Tesler, Universidad Estatal de Arizona/NASA
23	J. Tesler, Universidad Estatal de Arizona/NASA (*arriba*), Dimitry Schidlovsky (*abajo*)
24-25	Jared Schneidman/JSD (*arriba*), Dimitry Schidlovsky (*abajo*)
27	NASA
36-37	Jack Harris/Visual Logic; Dimitry Schidlovsky
38-40	Ian Worpole
42-43	Roberto Osti (*arriba*), Laurie Grace (*abajo*)
44	Ian Worpole
45	Tim Fuller
46	Oscar Miller, Science Photo Library/ Photo Researchers, Inc.
48-52	Jared Schneidman/JSD
53	John Reader, SPL/Photo Researchers, Inc. (*izda.*), J. William Schopf (*dcha.*)
54	Mark McMenamin, Escuela Mount Holyoke
56-57	David Starwood
58-59	Patricia J. Wynne
60-61	Charles R. Knight, cortesía de *National Geographic*
62	NASA
64	Ken Biggs/Tony Stone (*izda.*), Laura Colan/Photonica (*centro*), Barry Parker/Bruce Coleman, Inc. (*dcha.*)
65	NASA
66	Cortesía de Carl Sagan (*izda.*), NASA (*sup. dcha.*), Johnny Johnson (*inf. dcha.*)
68	Paul Horowitz, Univ. de Harvard
69	George Retseck
70-77	Robert D. Martin
78	Michael Nichols/Magnum Photos
80	Dana Burns-Pizer (*izquierda*), Judith Glick (*derecha*)
81	Johnny Johnson
82	Michael Nichols (*arriba*), Johnny Johnson (*abajo*)
83	Judith Glick
84	Dana Burns-Pizer
85	Al Tielemans/Duomo
86	Sam Ogden
88	Lisa Burnett
89	Kim Taylor/Bruce Coleman, Inc.
90	Jack Harris/Visual Logic
91	Centro de Diseño Electrónico, Dpto. Ingeniería eléctrica y Física aplicada, Universidad Case Western Reserve
94-95	Koji Yamashita/Imágenes Panorámicas
96	Ian Worpole; Jana Brenning (*dibujos*)
97	Ian Worpole
98-99	Robin Brickman
100	Thomas Nebbia
106-107	Kathy Konkle
108-112	Pour la Science

COLABORADORES DE ESTE NUMERO

Asesoramiento y traducción:

Angel Garcimartín: *La vida en el universo;* Juan Pedro Campos: *Evolución del universo;* León Garzón y Juan Pedro Campos: *Los elementos de la Tierra;* Ana María Rubio: *La evolución de la Tierra* y *Capacidad cerebral y evolución humana*; Javier de Mendoza: *Origen de la vida sobre la Tierra;* Joandomènec Ros: *La evolución de la vida en la Tierra* y *El mantenimiento de la vida sobre la Tierra*; Luis Bou: *La búsqueda de vida extraterrestre, ¿Serán los robots quienes hereden la Tierra?* y *Juegos matemáticos*; José Manuel García de la Mora: *Aparición de la inteligencia*; J. Vilardell: *Hace...* y *Taller y laboratorio*

Ciencia y empresa:
Manuel Puigcerver

INVESTIGACION Y CIENCIA

DIRECTOR GENERAL Francisco Gracia Guillén
EDICIONES José María Valderas, *director*
ADMINISTRACIÓN Pilar Bronchal, *directora*
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón
Bernat Peso Infante
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
EDITA Prensa Científica, S. A. Muntaner, 339 pral. 1.ª – 08021 Barcelona (ESPAÑA)
Teléfono (93) 414 33 44 Telefax (93) 414 54 13

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR Jonathan Piel
BOARD OF EDITORS Michelle Press, *Managing Editor*; John Rennie, *Associate Editor*; Timothy M. Beardsley; W. Wayt Gibbs; Marguerite Holloway; John Horgan, *Senior Writer*; Kristin Leutwyler; Philip Morrison, *Book Editor*; Madhusree Mukerjee; Sasha Nemecek; Corey S. Powell; Ricki L. Rusting; Gary Stix; Paul Wallich; Philip M. Yam.
CHAIRMAN AND CHIEF EXECUTIVE OFFICER John J. Hanley
CO-CHAIRMAN Dr. Pierre Gerckens
CHAIRMAN EMERITUS Gerard Piel

SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono (93) 414 33 44
Fax (93) 414 54 13

Precios de suscripción, en pesetas:

	Un año	Dos años
España	7.700	14.000
Extranjero	8.600	15.800

Ejemplares sueltos:

Ordinario: 700 pesetas
Extraordinario: 900 pesetas

—Todos los precios indicados incluyen el IVA, cuando es aplicable.

— En Canarias, Ceuta y Melilla los precios incluyen el transporte aéreo.

— El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.

DISTRIBUCION

para España:

MIDESA
Carretera de Irún, km. 13,350
(Variante de Fuencarral)
28049 Madrid Tel. (91) 662 10 00

para los restantes países:

Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª – 08021 Barcelona
Teléfono (93) 414 33 44

PUBLICIDAD

GM Publicidad
Francisca Martínez Soriano
Menorca, 8, bajo, centro, izquierda.
28009 Madrid
Tel. (91) 409 70 45 – Fax (91) 409 70 46

Cataluña y Baleares:
Miguel Munill
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona
Tel. (93) 321 21 14
Fax (93) 414 54 13



ISSN 0210136X Dep. legal: B. 38.999 - 76

Fotocomposición: Tecfa. Línea Fotocomposición, S.A. Almogàvers, 189 - 08018 Barcelona
Fotocromos reproducidos por Scan V2, S.A., Avda. Carrilet, 237 - 08907 l'Hospitalet (Barcelona)
Imprime Rotographik, S.A. Ctra. de Caldes, km 3,7 - Santa Perpètua de Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España

Los espacios en gris
corresponden a publicidad
en la edición impresa

Hace...

...cincuenta años

SCIENTIFIC AMERICAN: «Según James H. Carmine, de Philco Corporation, la industria de la radio ha invertido unos 25 millones de dólares en investigación y desarrollo al objeto de poner la televisión al alcance del gran público. ‘En cuanto sea posible fabricar y vender receptores de televisión, la gente se los quitará de las manos’, afirma Carmine.»

«La firma Firestone Tire and Rubber anuncia una nueva gomaespuma sintética tan blanda y esponjosa como un pastel de cabello de ángel. Este material de látex, batido hasta adquirir la consistencia de una espuma cremosa a la manera en que las amas de casa remueven las claras de huevo en repostería, atrapa un sinnúmero de minúsculas burbujas de aire interconectadas entre sí, que le confieren su blandura y permiten la libre circulación del aire para refrigeración.»

«La maquinaria textil común adaptada para trabajar con tejidos de fibra de vidrio permite ya torcer, doblar y tejer hilos de vidrio continuos y fibras cortadas. La finura y resistencia de las fibras de vidrio más recientes son casi increíbles. Fibras de un diámetro del orden de media centésima de milímetro poseen una resistencia textil superior a los diecisiete mil kilos por centímetro cuadrado. Experimentalmente se han conseguido fibras de media milésima de milímetro con una resistencia a la tracción superior a los ciento cuarenta mil kilos por centímetro cuadrado.»

«El desarrollo de un tubo de rayos X de precisión que funciona con dos millones de volts permite inspeccionar radiográficamente espesores metálicos extremadamente gruesos. Es más que probable que los médicos den la bienvenida a este nuevo tubo como una herramienta más eficaz en la terapia oncológica.»

«En la industria pesada, la principal objeción contra la incorporación de la mujer era la falta de robustez física para introducir y extraer piezas pesadas de las máquinas. Ello fue superado merced a la instalación de dispositivos de elevación manuales o eléctricos, o de grúas aéreas móviles. Quedó demostrado entonces que las mujeres, una vez aliviadas del esfuerzo físico excesivo, disfrutaban más que los hombres con el manejo de máquinas herramienta.»

«En la construcción del gigantesco Douglas C-57 entran más de 16 clases de madera, que van desde la ligerísima rota a la pesada caoba. En los aviones se emplea actualmente un 30 por ciento más de madera que hace exactamente un año.»

...cien años

SCIENTIFIC AMERICAN: «Una señora, que ha alcanzado los 120 años, mantenía que una tranquila felicidad es el auténtico elixir de la vida. Atribuyó a un prematuro matrimonio la muerte de un hermano, acaecida a la tierna edad de noventa años.»



Bicicleta Torre Eiffel

«Se han acometido investigaciones para determinar la acción específica de un notable descenso de temperatura sobre la luminosidad de los cuerpos que brillan en la oscuridad tras haber sido expuestos a la luz solar. La generación de fosforescencia requiere cierto movimiento de las moléculas constitutivas del cuerpo. Cuando éstas se hallan inmovilizadas, no se crean ondas luminosas y en consecuencia desaparece la fosforescencia.»

«Los donativos a la Sociedad del Hospital de Nueva York ascienden a una leve fracción de sus ingresos totales, de tal modo que la administración de esa institución representa perfectamente el reconfortante espectáculo de una gran institución benéfica estrictamente gestionada según principios financieros.»

«Mr Frederick E. Ives, de Philadelphia, exhibió hace unos días ante la Sociedad de Aficionados a la Fotografía su nueva diapositiva tricromática en pantalla. Las diapositivas que recogían paisajes presentaban un cielo demasiado azul. Pero algunas imágenes de flores y frutas daban una apariencia tan real que casi incitaban a cogerlas.»

«Muchas personas se pesan a menudo e imaginan saber su peso. ¡Linda ilusión! Nada hay más difícil que conocer exactamente el propio peso, incluso disponiendo de balanzas de la mejor calidad. Para los adultos, empero, es saludable consultar la balanza, pues ella es el barómetro de la salud. Cualquier incremento repentino de peso, equivalente a un kilo más o menos cada dos días, revela una tendencia a enfermar.»

«Una de las cosas más curiosas recientemente vistas es la llamada bicicleta Torre Eiffel. Aunque está construida como las demás, su cuadro mantiene al ciclista a una distancia de unos tres metros sobre el suelo. Los espíritus aventureros que montan en tan singular vehículo suelen ir acompañados de un grupo de compañeros que impiden que vehículos y peatones le priven el paso.»

La vida en el universo

Conocemos el universo. Conocemos el puesto que ocupa el hombre. Pero sólo hasta cierto punto. ¿Logrará la ciencia, en sus trabajos de frontera, descubrir algún papel singular para la vida inteligente?

Steven Weinberg

Lo cuenta el escritor norteamericano del siglo pasado Walt Whitman en un poema famoso. El vate, cansado y aburrido con los mapas y diagramas del sabio, les da carpetazo y sale a mirar por su cuenta, "en perfecto silencio, a las estrellas". Conducta ésta que siempre dejó amargo regusto en cuantos astrónomos leyeron el poema. El sentido de la belleza y la admiración por lo grandioso no se atrofian con el trabajo. Un cielo estrellado conmueve, por igual, a poetas y físicos. A la par que se adentra en la naturaleza, el científico refina su sensibilidad, atraído cada vez más por los misterios que se le resisten.

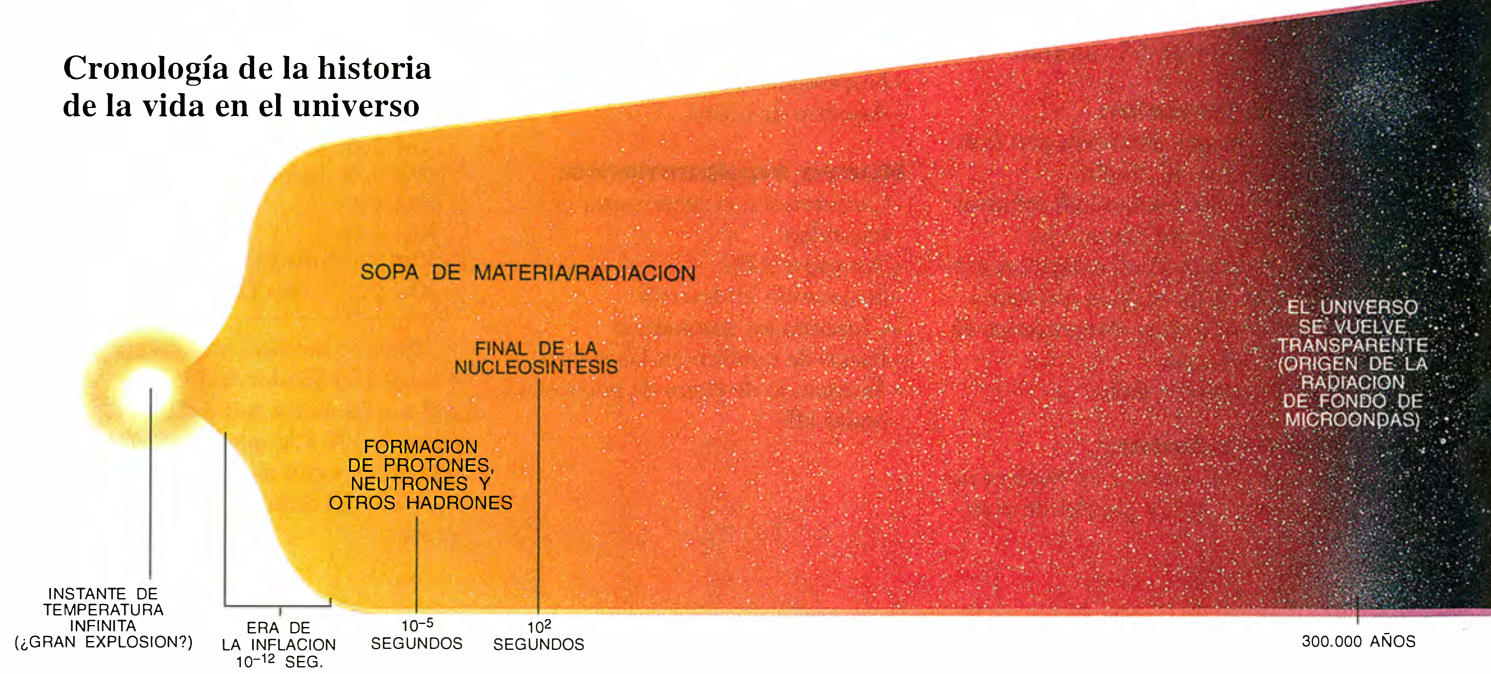
Las estrellas cercanas que Whitman contemplaba sin ayuda del telescopio han perdido buena parte de su misterio. Enormes programas de ordenador simulan las reacciones nucleares de los interiores estelares y remedan el flujo de energía por convección y radiación hasta la superficie visible, para explicar su aspecto actual y la evolución que sufrieron. La observación de los rayos gamma y los neutrinos provenientes de la supernova de la Gran Nube de Magallanes, en 1987, supuso una confirmación espectacular de la teoría sobre la estructura y evolución de las estrellas.

Pero quedan misterios por resolver, muchos de ellos expuestos en este número monográfico. ¿De qué tipo de materia están hechos galaxias y cúmulos? ¿Cómo se formaron los planetas, las estrellas y las galaxias? ¿Abundan en el universo hábitats propicios para el desarrollo de la vida? ¿Cómo se formaron los océanos y la atmósfera terrestre? ¿Cómo apareció la vida? ¿Cuáles son las relaciones de causa y efecto entre la evolución de la vida y el entorno terrestre en el que tuvo lugar? ¿Qué parte de azar hubo en el origen de la especie humana? ¿Cómo piensa el cerebro? ¿De qué modo responden las instituciones humanas ante el cambio ambiental y tecnológico?

Aunque nos hallemos quizá muy lejos de hallar la solución de algunos de estos problemas, sí podemos intuir qué tipo de soluciones admitirán. Se necesitarán, sin duda, nuevas ideas y enfoques, que habremos de encontrar, a buen seguro, sin salirnos de los confines de la ciencia tal como la entendemos hoy. Existen también misterios más allá de los confines de nuestra ciencia, temas cuya resolución no podrá basarse en lo ya conocido. Cuando explicamos cualquier fenómeno observacional, lo hacemos en términos de principios científicos que se apoyan a su vez en principios más profundos. Siguiendo esa cadena argumentativa, acabamos en las leyes de la naturaleza que no pueden explicarse en el estado actual de la ciencia.

Al tratar de la vida y de otros aspectos de la naturaleza, nuestros razonamientos incorporan un componente histórico. Algunos hechos históricos son accidentes que nunca podrán explicarse, salvo estadísticamente quizá: no daremos nunca con el motivo por el que la vida en la Tierra adopta la forma precisa que tiene, aunque es

Cronología de la historia de la vida en el universo



razonable que podamos demostrar que algunas formas son mucho más plausibles que otras. Podemos explicar muchísimo, incluso sobre fenómenos en los que la historia desempeña un papel particular, en función de las condiciones iniciales del universo y las leyes de la naturaleza. Pero, ¿cómo dar razón de las condiciones iniciales? Otros interrogantes sobrepasan las leyes de la naturaleza y las condiciones iniciales. Se refieren a la dualidad de la intervención de la vida inteligente —en cuanto parte del universo que nos proponemos entender y en cuanto sujeto que lo interpreta.

STEVEN WEINBERG se formó en la Universidad de Cornell, el Instituto Niels Bohr de Copenhague y la Universidad de Princeton. Nobel de física, miembro de la Academia Nacional de Ciencias y de la Regia Sociedad de Londres, amén de doctor honoris causa por una docena de universidades, Weinberg ha trabajado sobre todo en la unificación de la fuerza electromagnética y la fuerza nuclear débil.

Las leyes de la naturaleza nos permiten retroceder en la expansión del universo hasta lo que podría ser un verdadero comienzo, instante en que era infinitamente caliente y denso, hace de 10.000 a 20.000 millones de años. No nos ofrece suficiente confianza la validez de esas leyes en las condiciones extremas de temperatura y densidad para estar seguros de que existiera ese momento, mucho menos para detallar las condiciones iniciales, caso de que las hubiera. Sólo podemos describir las condiciones del universo desde sus 10^{-12} segundos de edad, es decir, a partir del instante nominal de temperatura infinita.

Para entonces, la temperatura del universo había descendido hasta 10^{15} grados; con esa temperatura sí adquieren validez nuestras teorías físicas. En esa condición, el universo estaría constituido por un gas compuesto de todos los tipos de partículas conocidas en la física de altas energías, junto con sus antipartículas; se aniquilarían y crearían en colisiones incesantes. A medida que el universo proseguía en su expansión y enfriamiento, el proceso de creación se tornó más lento que el de aniquilación; desaparecieron casi todas las partículas y antipartículas. De no haber sido por un pequeño exceso de electrones sobre la cuantía de antielectrones, y de quarks sobre antiquarks, no habría en nuestro universo actual ni electrones, ni quarks, las partículas ordinarias del mismo. Esa fracción precoz de materia sobre antimateria, exceso cifrado en una parte en 10^{10}, sobrevivió y formó núcleos atómicos ligeros tres minutos después, luego átomos un millón de años más tarde y, por último, núcleos pesados, elaborados en el interior de las estrellas, que suministran los elementos constituyentes de la vida. El exceso de materia sobre antimateria, de una parte en 10^{10}, es una de las condiciones iniciales clave que determinaron el posterior desarrollo del universo.

Cabe, además, que haya otros tipos de partículas, no observadas en nuestros laboratorios, que interactúen entre sí con menos intensidad que los quarks y los electrones y que, por tanto, se habrían aniquilado lentamente. Del universo primitivo pudiera haber quedado un buen número de estas partículas exóticas que formarían la materia oscura que, al parecer, constituye ahora la mayor parte de la masa del universo.

Aunque suele aceptarse que, cuando el universo tenía 10^{-12} segundos de edad, su contenido estaba distribuido de manera harto uniforme, hubo de haber pequeñas inhomogeneidades que desencadenarían, millones de años más tarde, la formación de las primeras galaxias y estrellas. No podemos observar directamente ninguna inhomogeneidad surgida en el intervalo del primer millón de años del cosmos, edad a la que el universo se tornó transparente. Los astrónomos se afanan por cartografiar las diminutas variaciones de intensidad de la radiación de fondo de microondas, información que les posibilita inferir la distribución primordial de materia y las inhomogeneidades existentes 10^{-12} segundos después del inicio.

Desde el punto de vista de la fí-



sica general, la historia del universo es tan sólo un ejemplo ilustrativo de las leyes de la naturaleza. En el nivel más profundo de nuestro razonamiento, dichas leyes toman la forma de teoría cuántica de campos. Cuando la mecánica cuántica se aplica a un campo, el electromagnético por ejemplo, vemos que la energía y el momento del campo vienen en paquetes —llamados cuantos— que se observan en los laboratorios en forma de partículas. El modelo estándar parte del postulado de un campo electromagnético, cuyos cuantos son los fotones; de un campo electrónico, cuyos cuantos son los electrones y los antielectrones, y de cierto número de campos cuyos cuantos son partículas agrupadas en las categorías de leptones y antileptones. Hay varios campos de quarks, cuyos cuantos son quarks y antiquarks, y otros once campos adicionales, cuyos cuantos son las partículas que transmiten la fuerza débil y la fuerte que actúan sobre las partículas elementales.

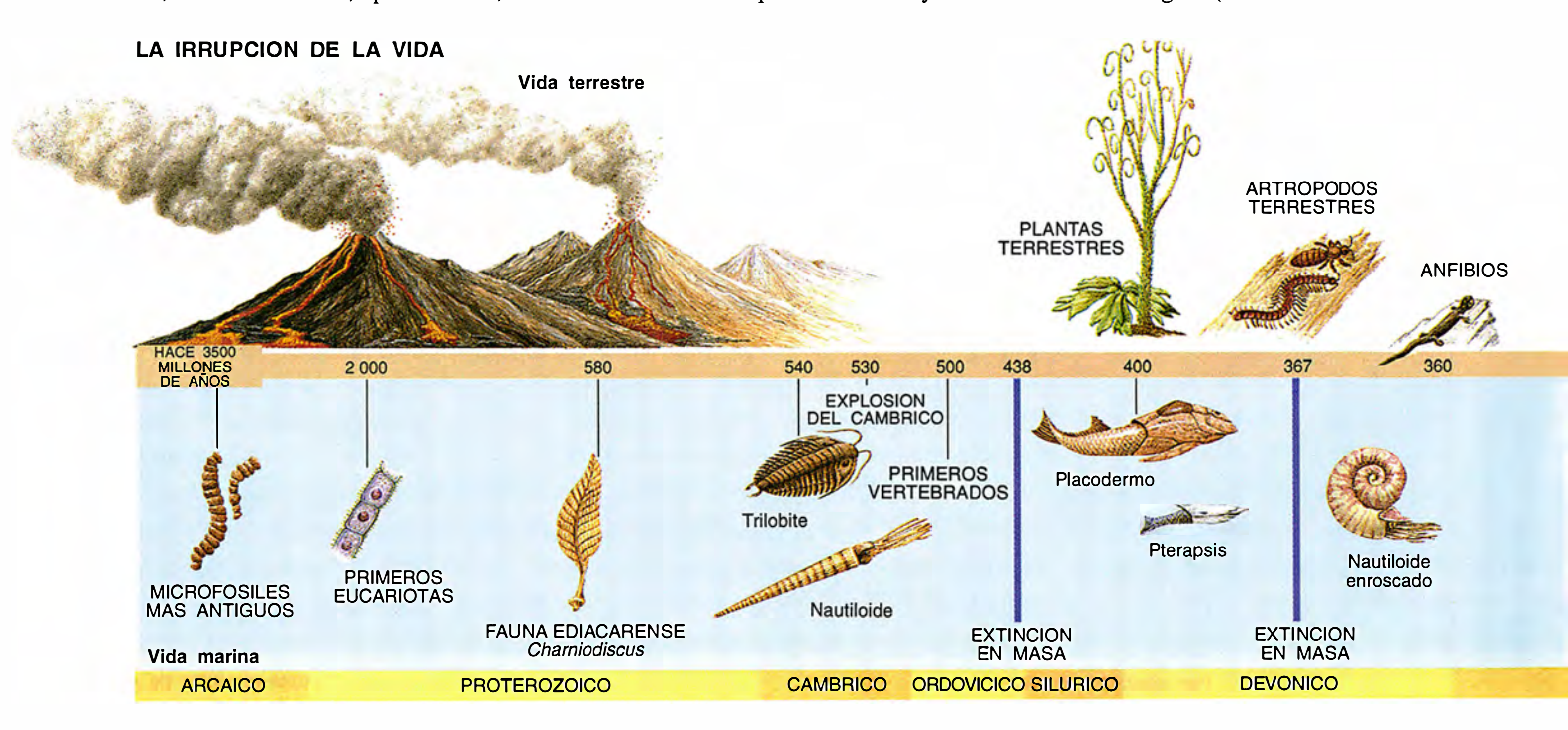
El modelo estándar no es la ley última de la naturaleza. Incluso en su forma más simple introduce varias convenciones. Hay unos 18 parámetros cuyo valor hay que extraerlo de la experimentación; está por explicar la diversidad de tipos de quarks y leptones. Tampoco sabemos qué mecanismo confiere masa a los quarks, leptones y demás partículas. Se confiaba en que ese rompecabezas lo recompusiera el Superconductor Supercolisionador, proyecto cancelado. La esperanza está ahora depositada en el Gran Colisionador de Hadrones, del CERN. Y, por último, el modelo es incompleto; no incluye la gravitación. Disponemos de una buena teoría de campos para la gravitación —la teoría de la relatividad general—, pero la versión cuántica de esta teoría deja de ser válida a muy altas energías.

Todos estos problemas podrían hallar respuesta en el marco de la teoría de cuerdas. Las partículas puntuales de la teoría cuántica de campos se consideran, en dicho cuadro, objetos finos y extensos de una dimensión, denominados cuerdas. Estas se presentan en varios modos vibracionales; cada modo se manifiesta en el laboratorio a través de una partícula distinta. Pero la teoría de cuerdas no se limita a ofrecer una descripción cuántica de la gravitación que adquiere significado en cualquier energía: uno de los modos de vibración de una cuerda se manifestaría a través de una partícula con las propiedades del gravitón, el cuanto del campo gravitatorio. Por tanto, la teoría de cuerdas justifica incluso la existencia de la gravitación. Además, hay versiones de la teoría de cuerdas que predicen algo parecido al menú de campos contemplado en el modelo estándar.

Pero la teoría de cuerdas no ha logrado todavía explicar o predecir ninguno de los parámetros numéricos del modelo estándar. Por ser las cuerdas demasiado pequeñas, no podemos tampoco detectar directamente la naturaleza filamentosa de las partículas elementales: hay más diferencia de tamaño entre la cuerda y un núcleo atómico que entre éste y una montaña. El esfuerzo dedicado a la investigación en teoría de cuerdas, sin la menor corroboración experimental, carece de precedentes en la historia de la ciencia. Constituye, sin embargo, nuestra mayor esperanza de un conocimiento más profundo de las leyes de la naturaleza.

Esos vacíos en nuestro conocimiento de las leyes de la naturaleza son los culpables de que ignoremos las condiciones a las que había llegado el universo a los 10^{-12} segundos de edad a partir de su brevísima historia anterior. De acuerdo con cálculos recientes, el leve exceso de quarks y electrones sobre antiquarks y antielectrones pudo haberse producido un poco antes, a una temperatura de unos 10^{16} grados. En ese momento, el universo sufrió una transición de fase (algo parecido a la congelación del agua), en la que las partículas adquirieron su primera masa. Pero no podemos justificar que dicho exceso deba ser de una parte en 10^{10}, ni calcular su valor exacto, hasta que no desentrañemos el mecanismo de producción de la masa.

La otra condición inicial, el grado de inhomogeneidad del universo primitivo, puede remontarse a épocas anteriores. En el modelo estándar y otras teorías cuánticas de campos de las partículas elementales, varios campos llenan el universo y toman valores distintos de cero, incluso en lo que se supone espacio vacío. En el estado presente del universo, estos campos han alcanzado unos valores de equilibrio que minimizan la densidad de energía del vacío. La constante cosmológica (denominación usual



de la densidad de energía del vacío) puede medirse a través del campo gravitatorio que produce. Al parecer, es muy pequeña.

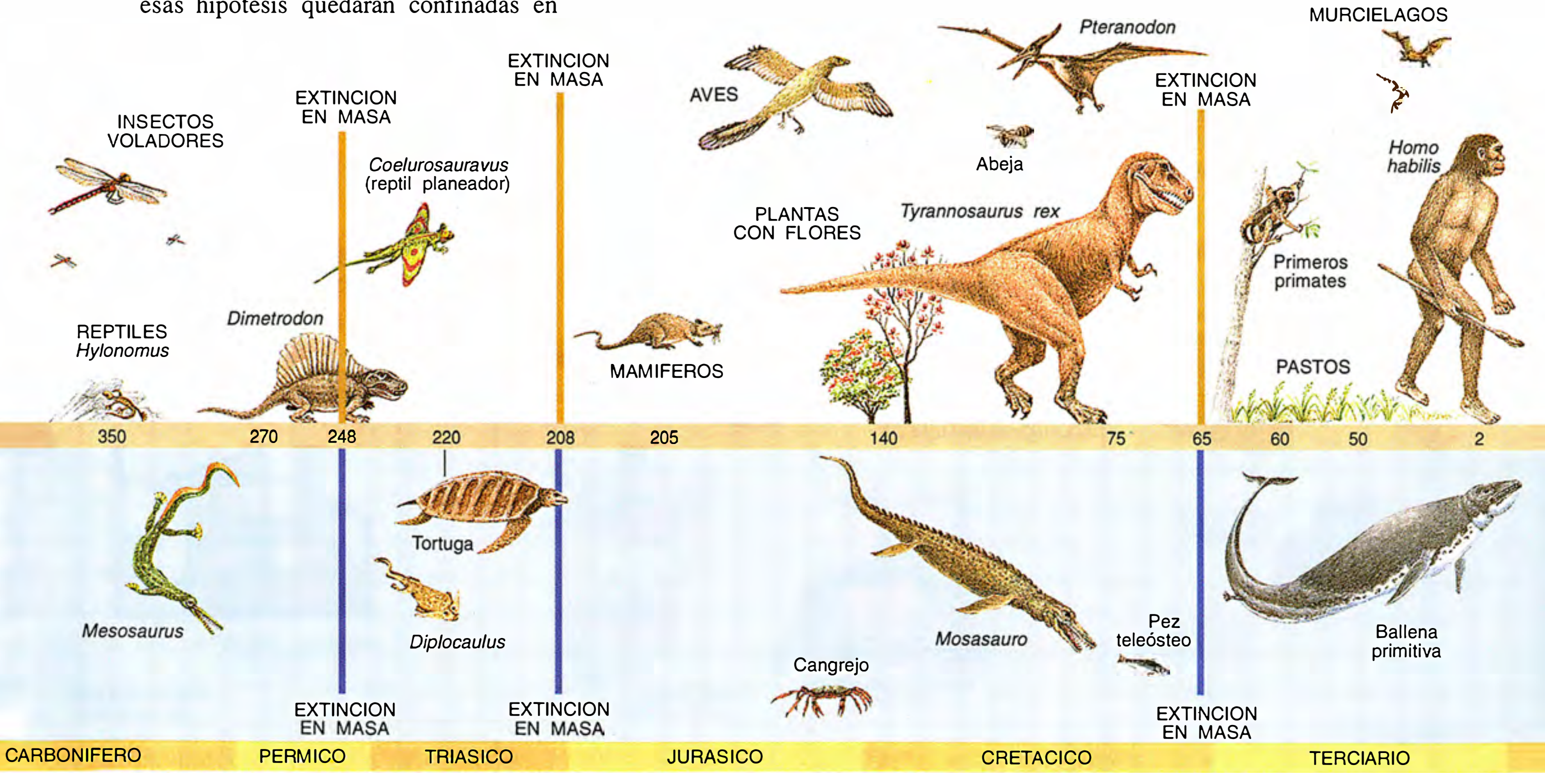
Para algunas teorías modernas, sin embargo, hubo un tiempo muy al principio del universo primitivo en el que estos campos no habían alcanzado sus valores de equilibrio. El vacío pudo, pues, haber tenido una enorme densidad de energía, capaz a su vez de provocar una inflación o expansión rápida del universo. Las minúsculas inhomogeneidades que pudieron causar las fluctuaciones cuánticas antes de la inflación se habrían dilatado durante la expansión y originado las inhomogeneidades mucho mayores que, millones de años más tarde, provocaron la formación de las galaxias. Se ha aventurado que la inflación con que se inició la expansión del universo visible no abarcó el cosmos entero. Pudo tratarse de un episodio local, dentro de una sucesión eterna de inflaciones locales que ocurren al azar en un universo infinito. Si esta conjetura fuera cierta, desaparecería el problema de las condiciones iniciales: lisa y llanamente, no habría momento inicial.

En ese cuadro, nuestra expansión local podría haber comenzado con determinados ingredientes o inhomogeneidades especiales, inteligibles sólo en un sentido estadístico. Ahora bien, en el tiempo de la inflación adquirió tal intensidad la gravitación, que los efectos gravitatorios cuánticos resultaron irrelevantes. De ahí que todas esas hipótesis quedarán confinadas en los lindes de la especulación mientras sigamos sin comprender la teoría cuántica de la gravitación.

La experiencia de los últimos 150 años nos muestra que la vida está sujeta a las mismas leyes de la naturaleza que la materia inerte. No hace falta apelar a un magno designio para entender el origen o la evolución de la vida. Problemas implicados en la descripción de la consciencia pueden abordarse a través del funcionamiento cerebral. Surgen esas cuestiones del conocimiento introspectivo de la consciencia, no de los sentidos. En línea de principio, nada impide que lleguemos a explicar el *comportamiento* de los demás en términos neurofisiológicos y, a la postre, físicos e históricos. Si triunfamos en esa empresa, es porque habremos encontrado que una parte de la explicación reside en un programa de actividad neural que asociaremos a nuestra propia consciencia.

Mas, por mucho que queramos adoptar una perspectiva unitaria de la naturaleza, siempre toparemos con la irreductible dualidad de la actividad de la vida inteligente en el universo, que es a la vez sujeto y objeto. Dualidad que llega incluso a los niveles más profundos de la física. En mecánica cuántica, describimos el estado de cualquier sistema mediante la función de onda. Según la interpretación de la mecánica cuántica elaborada en Copenhague a principios de los años treinta, las reglas para calcular la función de onda difieren mucho de los principios esgrimidos para interpretarla. De un lado, está la ecuación de Schrödinger, que describe de manera determinista cómo cambia con el tiempo la función de onda de cualquier sistema. Por otro lado, se tiene un conjunto de principios que nos indican cómo usar la función de onda para calcular las probabilidades de obtener los resultados posibles al realizar una medición.

La interpretación de Copenhague sostiene que, cuando medimos cualquier magnitud (por ejemplo, la posición o el momento), nosotros intervenimos hasta el punto de provocar un cambio impredecible en la función de onda (resultando una función de onda para la cual la magnitud que se midió adquiere un determinado valor) que no puede describirse con la ecuación determinista de Schrödinger. Así, antes de una medición la función de onda de un electrón que rota viene a ser la suma de varios términos que corresponden a diferentes direcciones del espín del electrón; en tal situación no puede afirmarse que el electrón gire en una dirección particular. Mas, al medir si el electrón gira en el sentido de las agujas del reloj o en sentido antihorario con respecto a algún eje, cambiamos la función de onda del electrón de suerte tal que queda girando en uno de esos dos sentidos. La medición se considera, pues, algo intrínsecamente diferente



de todos los demás procesos de la naturaleza. Y, pese a la discrepancia de opiniones, resulta difícil identificar algo que determine que se trata de una medición, salvo su efecto en una mente consciente.

Se dan cuatro reacciones, al menos, ante la interpretación de Copenhague. La primera, que consiste en aceptarla tal cual, abunda entre quienes siguen defendiendo la concepción dualista que coloca la vida y la consciencia en ámbitos diferentes del resto de la naturaleza. La segunda actitud es la de aceptar las reglas de la interpretación de Copenhague con fines prácticos, sin preocuparse de su significado último; suele darse entre los físicos en activo. En el tercer punto de vista se intenta evitar estos problemas introduciendo modificaciones en la mecánica cuántica; hasta el momento, no ha contado con el beneplácito de los físicos.

La cuarta reacción toma en serio la ecuación de Schrödinger, deja de lado el dualismo de la interpretación de Copenhague e intenta explicar el acierto de sus reglas mediante una descripción de los sujetos que miden y sus aparatos a través de la misma evolución determinista de la función de onda que gobierna todo lo demás. Cuando medimos alguna magnitud (verbigracia, la dirección del espín del electrón), colocamos al sistema en un entorno (en un campo magnético, por ejemplo) donde su energía (o momento) guarda una fuerte dependencia con el valor de la magnitud medida. Según la ecuación de Schrödinger, los distintos términos de la función de onda que atañen a diferentes energías oscilarán a un ritmo proporcional a esas energías.

Así, una medición hace que los términos de la función de onda que corresponden a los diferentes valores de la magnitud medida, como el espín del electrón, oscilen rápidamente con diferentes cadencias, de suerte que no interfieran entre sí en ninguna medición posterior. (Lo que podríamos comparar con las señales de radio de dos estaciones que emitan en dos frecuencias muy alejadas, que no interfieren.) Una medición motiva que, a efectos prácticos, la historia del universo diverja entre varios caminos diferentes que no se cruzan, uno para cada posible valor de la magnitud que se mide.

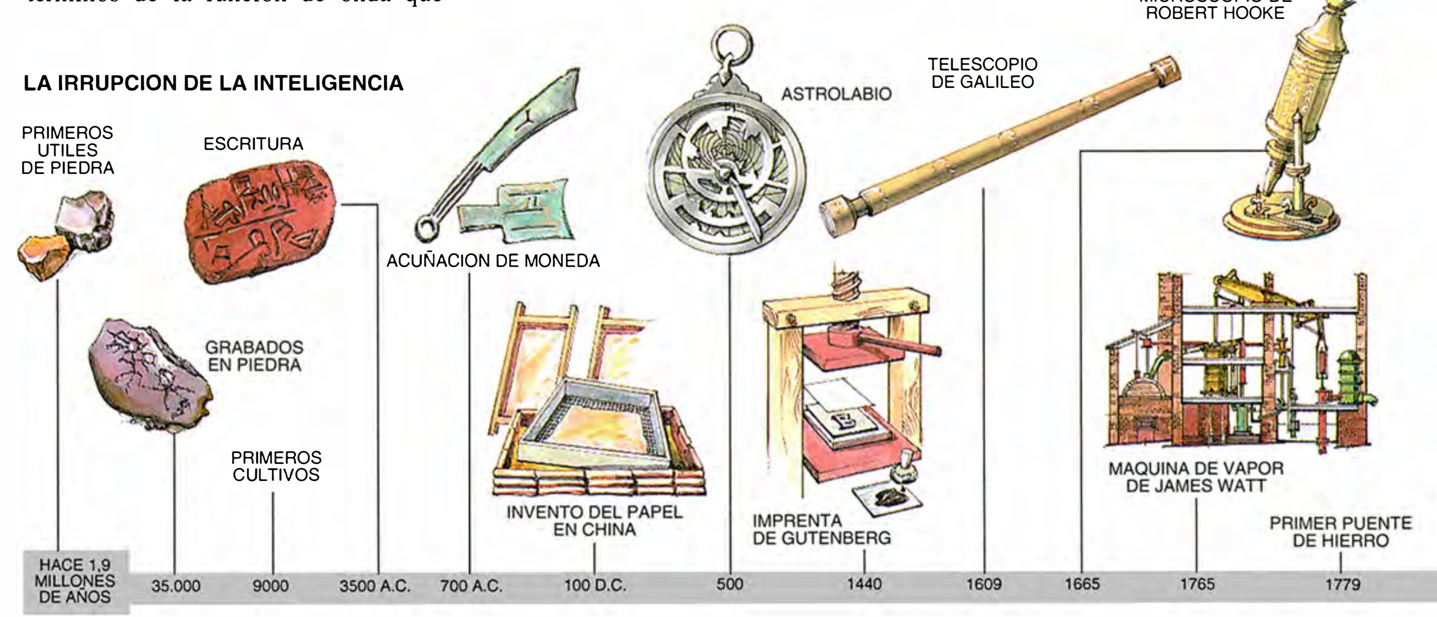
Pero, ¿cómo explicamos las reglas de Copenhague para calcular las probabilidades de estos diferentes "senderos del cosmos" en un mundo gobernado por la ecuación determinista de Schrödinger? Aunque se ha avanzado bastante en la resolución del problema, no se ha llegado todavía a una explicación satisfactoria. (Puestos a definirse, el autor se inclina por el último enfoque, reconociendo que existen grandes bazas en favor del segundo.)

Cuesta dejar de lado que los observadores son seres vivos cuando nos preguntamos por qué nuestros principios físicos son como son. La teoría cuántica de campos y la de cuerdas se proponen reconciliar la mecánica cuántica y la relatividad general de manera que se garantice la coherencia de los resultados experimentales. Se requiere que los resultados de nuestros cálculos dinámicos satisfagan condiciones que, en teoría de campos, se conocen como unitariedad, positividad y descomposición de agregados. En pocas palabras, estas condiciones imponen que las probabilidades sumen siempre el cien por cien, que sean siempre positivas y que las que se observen en experimentos distantes no estén relacionadas.

Eso no es grano de anís. Si ideamos ecuaciones dinámicas que den automáticamente resultados coherentes con algunas de estas condiciones, toparemos por lo común con resultados que incumplen las otras condiciones. Según parece, cualquier teoría cuántica relativista que satisfaga todas estas condiciones debe mostrarse a una energía suficientemente baja como en la que opera la teoría cuántica de campos. A buen seguro, ahí reside la razón por la cual la naturaleza se describe bien a las energías accesibles con el modelo estándar, una teoría cuántica de campos.

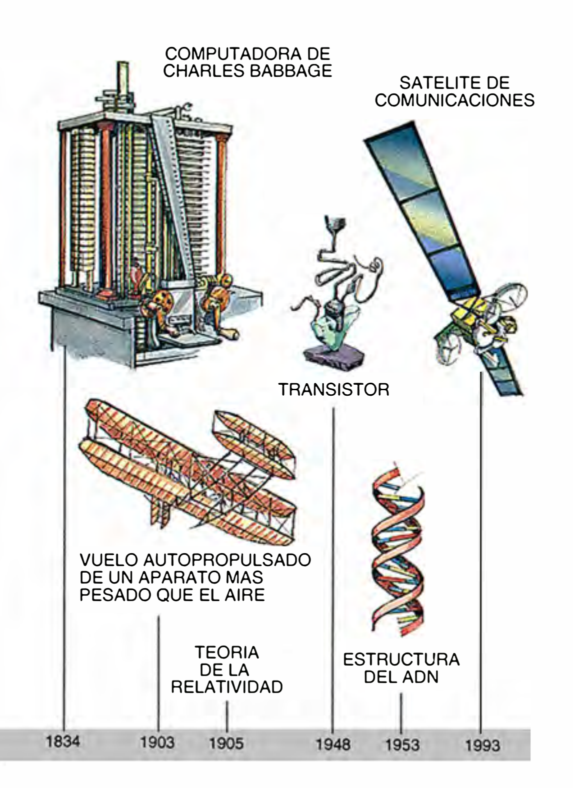
Las únicas teorías cuánticas relativistas, dotadas de coherencia matemática, que satisfacen estas condiciones a todas las energías y que incluyen la gravitación son las teorías de cuerdas. Cuando un alumno que estudia teoría de cuerdas pregunta por qué se formula tal o cual hipótesis matemática, se le contesta que para evitar el incumplimiento de los principios de unitariedad o la positividad. Pero, ¿por qué son éstas las condiciones correctas que deben imponerse a los resultados de todos los experimentos imaginables, si las leyes de la naturaleza permiten un universo que no contenga a ningún ser vivo capaz de realizar experimentos?

Esta cuestión, que no suele obstruir el trabajo de la física teórica, se plantea con apremio si pretendemos aplicar la mecánica cuántica al universo entero. De momento, no entendemos ni siquiera los principios para calcular o interpretar la función



de onda del universo, y no podemos resolver estos problemas imponiendo que todos los experimentos den resultados coherentes, porque, por definición, no hay observador a extramuros del universo que pueda experimentar con él.

Estos misterios redoblan su espesor cuando reflexionamos cuán sorprendente resulta que las leyes de la naturaleza y las condiciones iniciales del universo tuvieran que posibilitar la existencia de seres capaces de observarlo. La vida tal como la conocemos sería imposible si, de varias magnitudes físicas, una sola tomara un valor algo distinto. La más conocida es la energía de uno de los estados excitados del núcleo de carbono 12. Hay un paso crucial en la cadena de reacciones nucleares que origina los elementos pesados en el interior de las estrellas. En dicha etapa, dos átomos de helio se unen para formar el núcleo inestable de berilio 8, que algunas veces absorbe otro átomo de helio antes de fisionarse, dando lugar al carbono 12 en ese estado excitado. El carbono 12 emite entonces un fotón y decae a un estado estable de menor energía. En subsiguientes reacciones nucleares, el carbono se transforma en oxígeno, nitrógeno y otros elementos pesados necesarios para la vida. Pero la captura de helio por berilio 8 es un proceso resonante, cuya tasa de reacción es una función, con un brusco pico, de las energías de los núcleos involucrados. Si la energía del carbono 12 fuera un poco más alta, su tasa de formación sería mucho menor, y los núcleos de berilio 8, en su mayoría, se fisionarían en núcleos de helio antes de que diera tiempo a que el carbono se constituyese. El universo aparecería entonces formado, casi enteramente, por hidrógeno y helio, sin los ingredientes de la vida.



Discrepan los autores sobre el grado de ajuste fino de las constantes de la naturaleza para exigir la aparición de la vida. Existen motivos para esperar un estado excitado del carbono 12 cerca de la energía resonante. Pero cierta constante sí parece requerir un ajuste increíblemente fino; me refiero a la constante cosmológica o energía del vacío, antes aludida. No podemos calcularla. Lo que no empece que calculemos algunas contribuciones a la energía del vacío; por ejemplo, la energía de las fluctuaciones cuánticas en el campo gravitatorio que tienen longitudes de onda por encima de unos 10^{-33} centímetros.

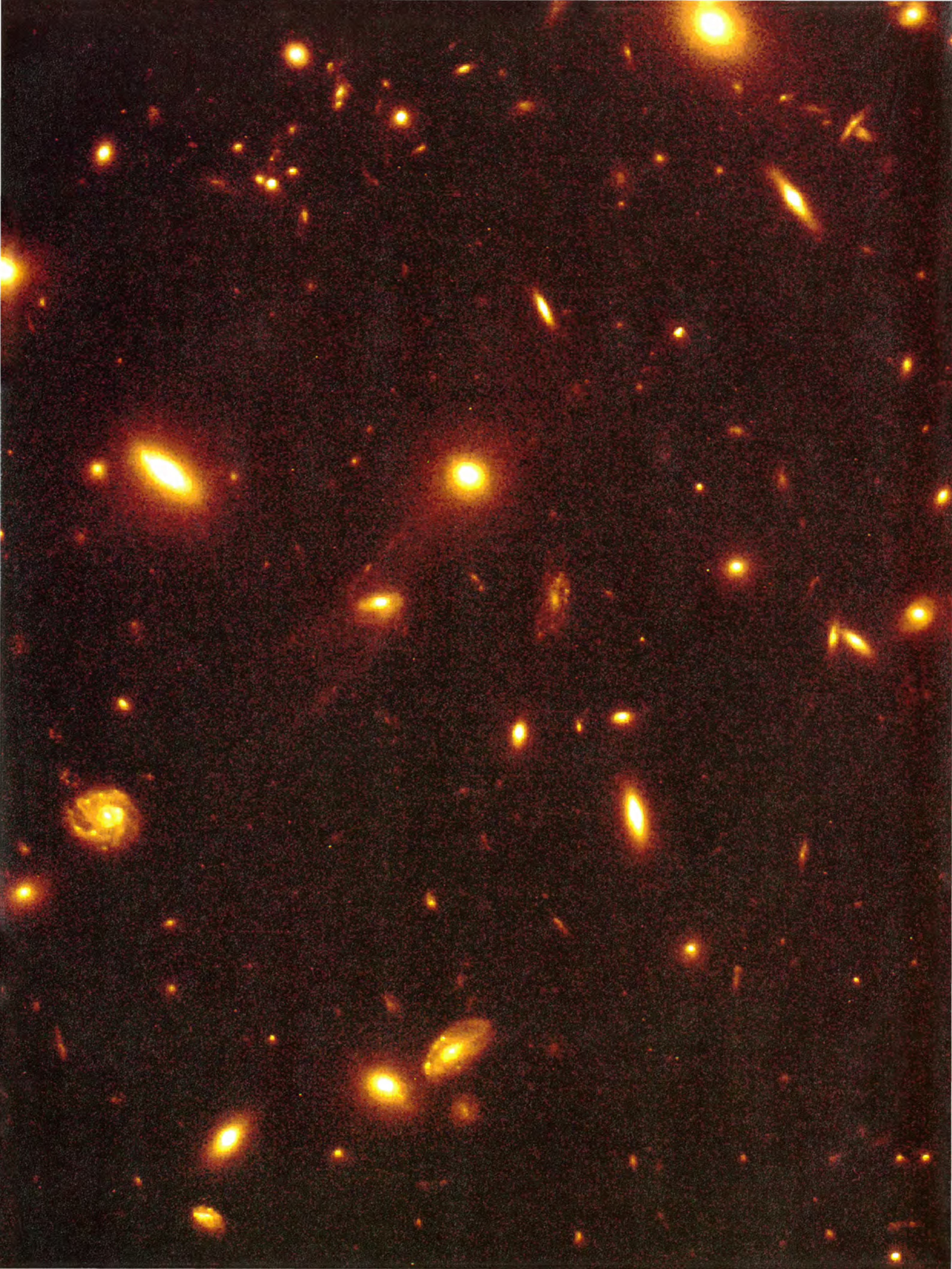
Estas contribuciones vienen a ser de unos 120 órdenes de magnitud mayores que los valores máximos permitidos por la tasa actual de expansión del universo. Si las diversas contribuciones a la energía del vacío no se anularan por entero o casi, entonces, y dependiendo del valor total de la energía del vacío, el universo completaría un ciclo de expansión y contracción antes de que la vida dispusiera de tiempo para formarse o bien se expandiría con una celeridad tal que no llegarían a generarse galaxias ni estrellas.

Así pues, la existencia de cualquier clase de vida parece requerir que se cancelen las contribuciones a la energía del vacío, calculadas con 120 decimales. Es posible que, algún día, una teoría logre explicar dicha cancelación. De momento, lo mismo en teoría de cuerdas que en teoría cuántica de campos, la energía del vacío demanda constantes arbitrarias, cuidadosamente ajustadas para que la energía del vacío total sea cuan pequeña exige la aparición de la vida.

Todos estos problemas admiten solución sin involucrar la vida o la consciencia en las leyes fundamentales de la naturaleza o en las condiciones iniciales. Pudiera ocurrir que nuestras "constantes de la naturaleza" variaran de una parte del universo a otra. (Donde por parte del universo podemos entender varias cosas. Así, la frase podría referirse a distintas expansiones locales desatadas por episodios de inflación en los cuales los campos que llenan el universo tomaran diferentes valores, o podría aludir a los diferentes senderos cosmológicos que aparecen en algunas versiones de cosmología cuántica.) Si ése fuera el caso, no sería sorprendente descubrir que la vida es posible en algunas partes del universo, aunque quizá no en la mayoría. Naturalmente, cualquier ser vivo que evolucionara hasta el punto de poder medir las constantes de la naturaleza encontraría que esas constantes tienen valores que permiten la existencia de la vida. Las constantes tendrán otros valores en otras partes del universo, pero no hay nadie para medirlas. (Esta es una versión del principio antrópico.) Ni siquiera entonces se asignaría a la vida un papel relevante en las leyes fundamentales; plásticamente, que el Sol tenga un planeta donde encontramos vida no quiere decir que la vida interviniera en el origen del sistema solar. Las leyes fundamentales de la naturaleza serían las que describen la *distribución* de valores de las constantes de la naturaleza entre las diferentes partes del universo, y en esas leyes la vida no tendría ninguna relevancia especial.

Si el contenido de la ciencia es, a fin de cuentas, impersonal, su desenvolvimiento forma parte de la cultura humana, y no la menos interesante. Algunos filósofos y sociólogos han ido demasiado lejos y sostienen que los principios científicos son, en todo o en parte, construcciones sociales, como las leyes del contrato civil o las normas del juego del mus. Los científicos rechazan, apoyados en su experiencia, el "constructivismo social".

Hay trabajos que tienen un valor práctico obvio, pero otros no, en particular la investigación en los problemas de frontera. Las barreras que impiden la comunicación entre los científicos y el público no son impermeables. En su tiempo, los *Principia* de Newton fueron entendidos sólo por un puñado de europeos. Al final la idea de que nosotros y nuestro universo estamos gobernados por unas leyes precisas y cognoscibles acabó difundiéndose por todo el mundo civilizado. La teoría de la evolución se encontró con un rechazo frontal al principio. La investigación actual en las fronteras de la ciencia exploran unas condiciones de energía, tiempo y distancia mucho más alejadas de la vida de cada día y con frecuencia sólo se pueden describir mediante un lenguaje matemático alambicado. Pero, vistas las cosas en perspectiva, cuanto descubramos sobre el origen y evolución de nuestro universo entrará a formar parte del legado intelectual de la humanidad.



Evolución del universo

Hace unos quince mil millones de años, el universo surgió de un piélago de materia y energía. Era un mar denso y caliente. Mas, a medida que se expandió y enfrió, brotaron las galaxias, las estrellas, los planetas y la vida

P. James E. Peebles, David N. Schramm, Edwin L. Tumer y Richard G. Kron

Hace unos 15.000 millones de años, toda la materia y la energía que podemos observar se concentraban en una región menor que un duro. Empezó a expandirse y enfriarse con increíble rapidez. Cuando la temperatura cayó hasta cien millones de veces la del núcleo solar, las fuerzas de la naturaleza adquirieron sus propiedades actuales y las partículas elementales que reciben el nombre de quarks vagaron libremente en un mar de energía. Al expandirse el universo otras mil veces, toda la materia que podemos medir llenaba una región del tamaño del sistema solar.

En ese momento, los quarks libres quedaron confinados en neutrones y protones, los cuales, una vez el cosmos hubo crecido mil veces más, se combinaron y formaron núcleos atómicos; así se generó la mayor parte del helio y del deuterio existentes hoy en día. Todo esto ocurrió en el primer minuto de la expansión. Las condiciones eran todavía, sin embargo, demasiado calientes para que los núcleos atómicos capturasen electrones. Los átomos neutros aparecieron de forma abundante sólo cuando la expansión prosiguió durante 300.000 años y el tamaño del universo vino a ser mil veces menor que el de ahora. Los átomos neutros empezaron a juntarse en nubes de gas, que acabarían por convertirse en estrellas. Por la época en que el universo se había expandido hasta un quinto de su tamaño actual, las estrellas habían formado grupos en los que podían reconocerse ya las galaxias jóvenes.

Al alcanzar el universo la mitad de su tamaño actual, las reacciones nucleares que ocurrían en las estrellas habían producido la mayor parte de los elementos pesados con los que se forjaron los planetas terrestres. Nuestro sistema solar es bastante joven: se formó hace 5000 millones de años, cuando el tamaño del universo era dos terceras partes del actual. Andando el tiempo, la formación de las estrellas consumió el suministro de gas de las galaxias, lo que significa que la población de estrellas está menguando. Dentro de 15.000 millones de años, las estrellas del estilo de nuestro Sol serán bastante raras y el universo mucho menos hospitalario para el hombre.

El conocimiento del origen y evolución del universo es uno de los grandes logros de la ciencia del siglo XX. Es el fruto de muchos años de teorías y experimentos innovadores. Los telescopios modernos, instalados en el suelo o en el espacio, detectan la luz procedente de galaxias situadas a miles de millones de años luz, y nos enseñan cómo era el universo en su juventud. Los aceleradores de partículas sondean la física básica del entorno de altas energías que imperaba en los inicios del universo. Los satélites detectan la radiación cósmica de fondo, residuo de las primeras etapas de la expansión, y proporcionan así una imagen del universo a la mayor escala que podemos observar.

Nuestros mejores esfuerzos dedicados a explicar este aluvión de datos se encierran en una teoría que recibe el nombre de modelo cosmológico estándar o cosmología de la gran explosión ("big bang"), cuyo postulado central afirma que, en un promedio a gran escala, el universo se expande de manera casi homogénea a partir de un estado inicial denso. La teoría de la gran explosión parece bastante consolidada, aunque no está exenta de puntos obscuros. Los astrónomos no acaban de desentrañar el mecanismo de formación de las galaxias, pero no hay razón para pensar que el proceso no ocurriese dentro de los cauces de la gran explosión. Las predicciones de la teoría han sobrevivido hasta la fecha a todas las comprobaciones realizadas.

Persisten, además, muchos interrogantes fundamentales para los que carecemos de respuesta: ¿cómo era el universo antes de que se expandiese? (Ninguna de nuestras observaciones permite retrotraernos más allá del inicio de la expansión.) ¿Qué ocurrirá en el futuro remoto, cuando la última estrella haya agotado su reserva de combustible nuclear?

La ciencia acepta sólo lo que se comprueba mediante experimentos u observaciones. Albert Einstein nos dio la teoría general de la relatividad, que establece las relaciones entre la masa, la energía, el espacio y el tiempo. Einstein mostró que una distribución homogénea de materia en el espacio casa muy bien con su teoría. Supuso, sin discutirlo, que el universo es estático, inalterable en el promedio a gran escala.

P. JAMES E. PEEBLES, DAVID N. SCHRAMM, EDWIN L. TURNER y RICHARD G. KRON han recibido, a título individual, los mayores honores por sus trabajos sobre la evolución del universo. Peebles, experto en gravedad, enseña física en la Universidad de Princeton. Schramm ocupa la cátedra Louis Block de ciencias físicas de la Universidad de Chicago. Turner, docente en Princeton, dirige en Baltimore la supervisión del Instituto Científico del Telescopio Espacial. Kron compagina las clases de astronomía y astrofísica de Chicago con la investigación experimental en el Laboratorio Fermi del Acelerador Nacional.

1. CUMULO GALACTICO, exponente de lo que era el universo cuando tenía un sesenta por ciento de su edad actual. El *Telescopio Espacial Hubble* tomó esta imagen enfocando el cúmulo durante diez órbitas. Varios son los pares de galaxias en que un miembro parece hallarse sujeto al campo gravitatorio del otro. Tales interacciones, muy raras en los cúmulos que nos están próximos, constituyen una manifestación de la evolución del universo.

En 1922, Alexander A. Friedmann cayó en la cuenta de que el universo de Einstein era inestable; la menor perturbación haría que se expandiese o contrajese. Por esa época, Vesto M. Slipher, del Observatorio Lowell, iba reuniendo las primeras pruebas de que las galaxias se están distanciando entre sí. Un poco más tarde, en 1929, Edwin P. Hubble mostró que la velocidad a la que una galaxia se aleja de nosotros es proporcional a la distancia a la que se encuentra del observador.

La existencia de un universo en expansión implica que el cosmos se ha ido desarrollando a partir de una densa concentración de materia hasta llegar a la distribución actual, vastamente diseminada, de las galaxias. El primero que llamó a este proceso "la gran explosión" fue Fred Hoyle. Quería ridiculizar la teoría, pero el nombre tuvo tanto gancho que acabó por imponerse. Sin embargo, el describir la expansión como un tipo de explosión de la materia que se produce en algún punto concreto del espacio induce a error, porque la idea no es ésa en absoluto.

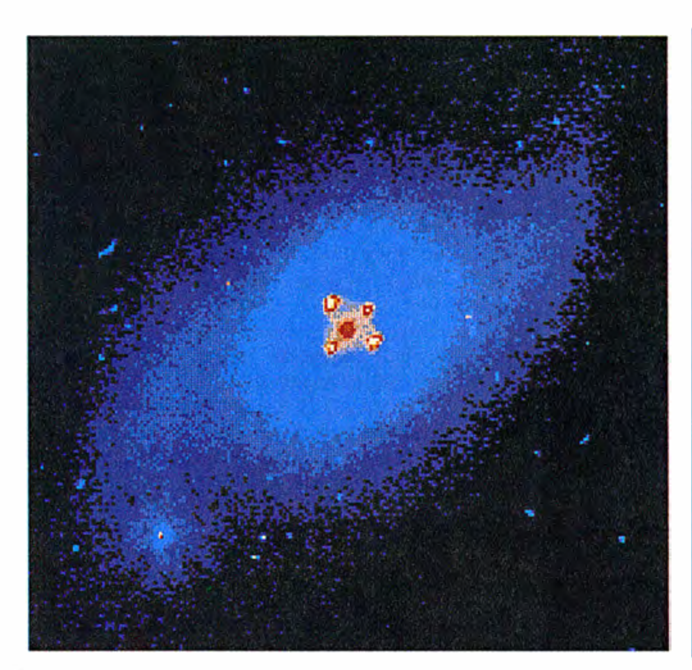
En el universo de Einstein, el concepto de espacio y la distribución de materia van íntimamente unidos; la expansión del sistema de las galaxias manifiesta el despliegue del espacio mismo. Un rasgo esencial de la teoría es que la densidad media del espacio decae conforme el universo se expande; la distribución de materia no tiene un borde observable. En una explosión, las partículas más rápidas se mueven hacia el espacio vacío, pero en la cosmología de la gran explosión las partículas llenan uniformemente todo el espacio. La expansión del universo ha tenido poca influencia en el tamaño de las galaxias. Ni siquiera la ejerce en el de los cúmulos galácticos que la gravedad mantiene unidos; el espacio, simplemente, se abre entre ellos. En este sentido, la expansión es similar a un pan de pasas que se hincha. La masa sería el espacio y las pasas, los cúmulos. A medida que la masa se expande, las pasas se separan. Además, la velocidad con la que dos pasas cualesquiera se alejan guarda una relación directa y positiva con la cantidad de miga que las separa.

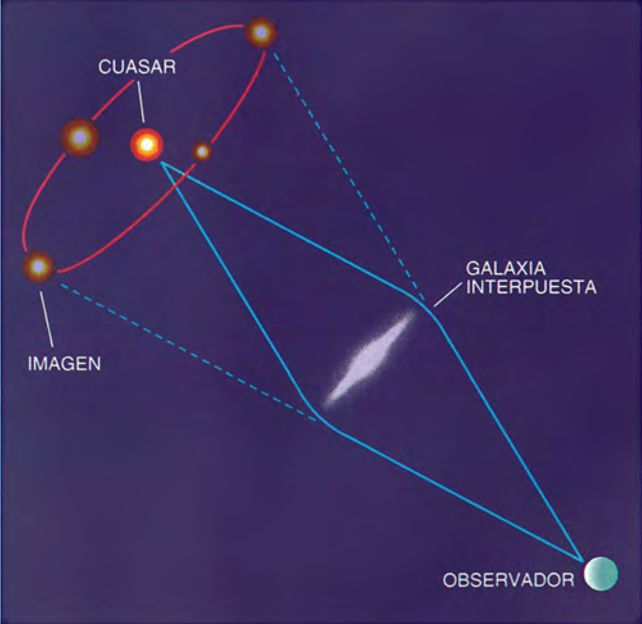
Las pruebas en favor de la expansión del universo se han ido acumulando desde hace más de medio siglo. El primer indicio importante es el corrimiento hacia el rojo. Las galaxias emiten o absorben con mayor fuerza ciertas longitudes de onda que otras. En una galaxia que se aleje de nosotros, estas características de emisión y de absorción se desplazan a longitudes de onda más largas, es decir, enrojecen con el aumento de la velocidad de recesión.

Las mediciones de Hubble indicaban que el corrimiento hacia el rojo de una galaxia remota es mayor que el de las más cercanas a la Tierra. Esta relación, o ley de Hubble, es lo que cabría esperar en un universo que se expandiese uniformemente; de acuerdo con la ley de Hubble, la velocidad de recesión de una galaxia es igual a su distancia multiplicada por la constante de Hubble. El corrimiento hacia el rojo de las galaxias próximas es un efecto bastante sutil y se requieren buenos instrumentos para detectarlo; por el contrario, cuando se trata de objetos muy lejanos —radiogalaxias y cuásares—, ese fenómeno adquiere proporciones asombrosas: los hay que se alejan a más del 90 por ciento de la velocidad de la luz.

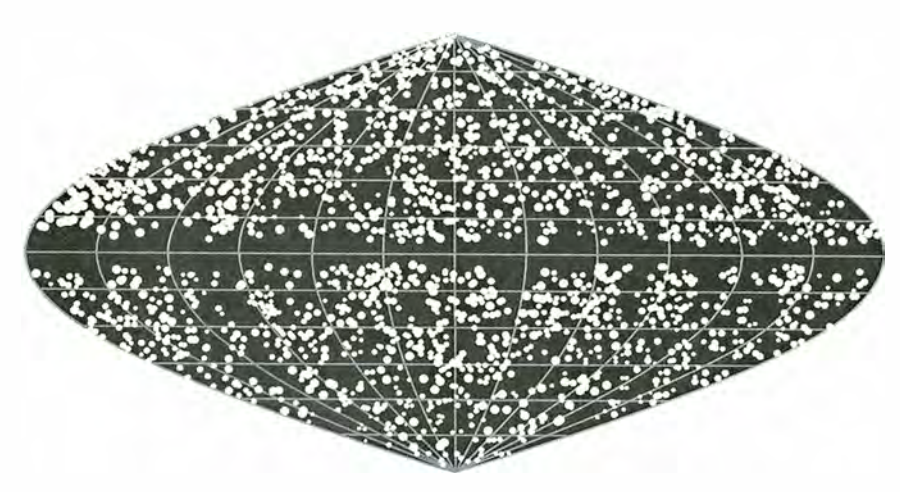
Hubble contribuyó a otra parte crucial del cuadro. Contó el número de galaxias visibles en diferentes direcciones del cielo y halló que aparecían distribuidas con bastante uniformidad. Parecía que el valor de la constante de Hubble era el mismo en todas las direcciones, resultado forzoso de la expansión uniforme. Los rastreos modernos confirman el principio fundamental de que el universo, considerado a gran escala, es homogéneo. Aunque en los mapas de la distribución de las galaxias cercanas se observan aglomeraciones, los rastreos más profundos muestran una notable distribución uniforme.

Sea por caso la Vía Láctea. Pertenece a un agrupamiento de dos docenas de galaxias, que a su vez forma parte de un complejo de galaxias que sobresale del supercúmulo local. Se ha ido ascendiendo por la jerarquía de cúmulos hasta dimensiones de unos quinientos millones de años luz. Las fluctuaciones de la densidad media de la materia disminuyen a medida que aumenta la escala de la estructura que se investiga. En los mapas que





2. IMAGENES MULTIPLES de un cuásar lejano (*izquierda*), el resultado del efecto de lente gravitatoria. Ocurre ese fenómeno cuando el campo gravitatorio de una galaxia interpuesta dobla la luz de un objeto distante. En este caso, la galaxia, en el centro, produce cuatro imágenes del cuásar. En la fotografía intervino el telescopio *Hubble*.



3. HOMOGENEIDAD DE LA DISTRIBUCION DE LAS GALAXIAS, puesta de manifiesto en este mapa que incluye objetos que están de 300 a 1000 millones de años luz. La única inhomogeneidad, la franja alrededor de la línea central se debe al obscurecimiento de parte del firmamento por la Vía Láctea.

cubren distancias que se acercan al límite observable, el cambio en la densidad media de la materia no llega a una décima por ciento.

Para comprobar la ley de Hubble hay que medir las distancias a que se hallan las galaxias, distancias que inferimos del brillo emitido. Si una galaxia luce la cuarta parte que otra, igual en todo lo demás, deducimos que se halla a doble distancia. Objetan, sin embargo, algunos que una galaxia que aparece más pequeña y menos luminosa podría no estar más lejos. Por fortuna, disponemos de una prueba directa de que los objetos con mayores corrimientos hacia el rojo son los más alejados.

La prueba procede de la observación de un efecto de "lente gravitatoria", en el que un objeto de la masa y densidad de una galaxia puede convertirse en lente natural y producir una imagen distorsionada y aumentada (e incluso imágenes múltiples) de cualquier fuente de radiación que se halle en su trasfondo. El objeto en cuestión genera ese efecto doblando las trayectorias de los rayos de luz y de otras radiaciones electromagnéticas. Por tanto, si una galaxia se halla en la línea de visión entre la Tierra y algún objeto lejano, doblará los rayos de luz procedentes de éste y los observaremos. En los últimos años se ha descubierto una docena larga de lentes gravitatorias. Se ve siempre que el corrimiento hacia el rojo del objeto que está detrás de la lente es mayor que el de la propia lente, lo que confirma la parte cualitativa de la predicción establecida por la ley de Hubble.

La ley de Hubble sirve también para calcular la edad del cosmos. Con mayor precisión, el tiempo transcurrido desde la gran explosión es función del valor presente de la constante de Hubble y de su ritmo de cambio. Se ha determinado la velocidad aproximada de la expansión, pero nadie ha logrado medir de forma exacta la edad.

Podemos abordar dicho parámetro a partir de la densidad media del universo. Como la gravedad ejerce una fuerza que se opone a la expansión, las galaxias tenderán a distanciarse hoy con mayor lentitud que en el pasado. El ritmo de cambio de la expansión guarda, pues, relación con la atracción gravitatoria del universo, determinada a su vez por la densidad media de éste. Si la densidad es la de la materia visible que hay en las galaxias, o en su vecindad, la edad del universo se hallará probablemente entre los 12.000 y 20.000 mil millones de años. (Este intervalo refleja la incertidumbre en la velocidad de la expansión.)

Muchos opinan, sin embargo, que la densidad rebasa ese valor mínimo, diferencia de la que sería responsable la materia oscura. Y se defiende con sólido respaldo que la densidad del universo es justo la necesaria para que, en el futuro remoto, la expansión decelere hasta casi detenerse. Bajo ese supuesto, la edad del universo se cifraría entre 7000 y 13.000 mil millones de años.

Para acotar mejor los valores, seguimos investigando las distancias de las galaxias y la densidad del universo. Los cálculos sobre el tiempo que lleva operando la expansión constituyen tests importantes para comprobar la validez del modelo de la gran explosión. Si dicha teoría anda en lo cierto, todo cuanto hay en el universo visible tendrá menos años que los transcurridos desde el inicio de la expansión.

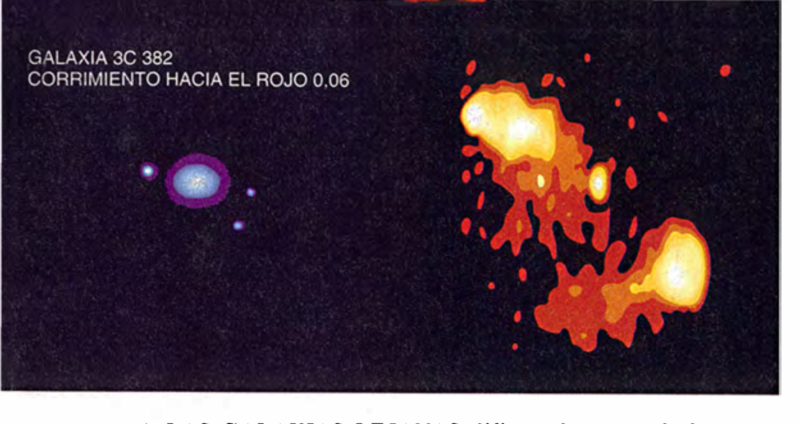
Ambas escalas temporales concuerdan con bastante aproximación. Así, las estrellas más antiguas del disco de la Vía Láctea tienen unos 9000 millones de años, cálculo inferido de la velocidad de enfriamiento de las enanas blancas; pero son más viejas las del halo de la Vía Láctea, con unos 15.000 millones de años, número que sale de las técnicas de datación radiactiva. Esas edades, obtenidas en el laboratorio con técnicas de la física atómica y nuclear, concuerdan, de forma harto aproximada, con las edades resultantes de la medición de la expansión cósmica.

La teoría del estado estacionario, propuesta en 1946 por Hoyle, Hermann Bondi y Thomas Gold, da cuenta también de la expansión y la homogeneidad del universo. En esa cosmología, el universo se expandirá siempre; para rellenar los vacíos, va creándose materia espontáneamente. Cuando esta materia se acumula, forma nuevas estrellas que reemplazan a las viejas.

La hipótesis del estado estacionario predice que los conjuntos de galaxias que están cerca de nosotros deberían, estadísticamente, parecerse a los más alejados. Justamente lo contrario defiende la teoría de la gran explosión: si todas las galaxias se formaron hace mucho, se nos mostrarían más jóvenes las galaxias lejanas que las cercanas, pues la luz procedente de aquéllas necesita más tiempo para llegar hasta nosotros; las galaxias remotas deberían contener más estrellas de vida corta y más gas, a partir de cual se crearían futuras generaciones de estrellas.

La resolución observacional de esa antinomia es bastante sencilla en línea de principio. Pero los astrónomos han tardado muchos años en lograr detectores de sensibilidad suficiente para abordar las galaxias lejanas. Cuando examinaron las cercanas, que emiten poderosamente en las longitudes de onda de radio, vieron, a longitudes de onda ópticas, sistemas de estrellas bastante redondos. Las radiogalaxias lejanas, por su parte, parecían estructuras alargadas y, a veces, irregulares. Además, en la mayoría de las radiogalaxias lejanas la distribución de la luz tiende a alinearse con el patrón de la radioemisión, lo que no sucede en las inmediatas.

De manera similar, cuando se estudió la población de los cúmulos galácticos, grandes y densos, se apreciaron diferencias entre los próximos y los alejados. Los cúmulos distantes





4. LAS GALAXIAS LEJANAS difieren bastante de las cercanas, señal de que las galaxias evolucionaron desde formas primitivas más irregulares. Entre las galaxias que brillan en longitudes de onda ópticas (*azul*) y de radio (*rojo*), las cercanas muestran una morfología regular y elíptica a longitudes de onda ópticas y muy alargada en las de radio. Conforme crece el corrimiento hacia el rojo, y por tanto la distancia, las galaxias adquieren formas alargadas más irregulares, alineadas en las longitudes de onda ópticas y de radio. El último recuadro de la derecha nos ilustra una galaxia de cuando el universo tenía un diez por ciento de su edad actual.

comprenden galaxias azuladas que nos hablan de una formación activa de estrellas. Cúmulos cercanos, aunque de idéntico jaez, encierran galaxias rojizas donde la formación activa de estrellas cesó hace tiempo. Las observaciones efectuadas con el *Telescopio Espacial Hubble* confirman que la mayor intensidad de la formación de estrellas en esos cúmulos más jovenes resulta, en parte al menos, de las colisiones entre sus galaxias, proceso mucho más raro en la época presente.

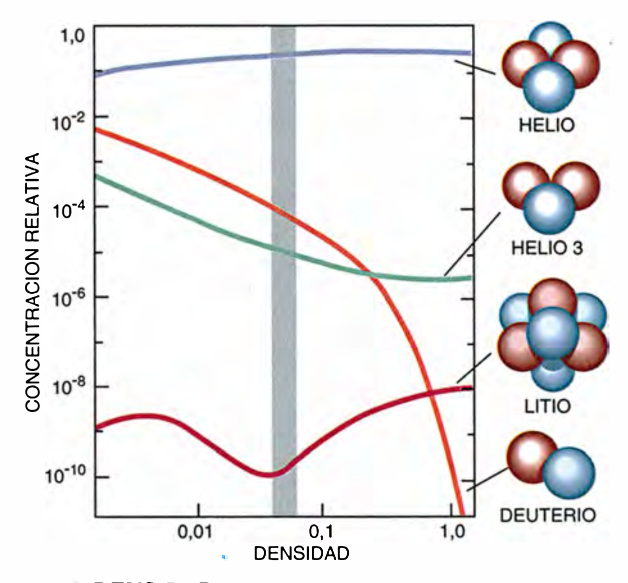
Por consiguiente, si las galaxias se hallan en un proceso de mutuo distanciamiento y evolucionando a partir de sus formas anteriores, parece lógico que alguna vez se aglomeraran en un denso mar de materia y energía. En efecto, en 1927, cuando se sabía muy poco sobre las galaxias lejanas, el padre Georges Lemaître propuso que la expansión del universo podría remontarse hasta un estado extraordinariamente denso, al que llamó "superátomo" primigenio. Incluso sería posible, creía, que se detectara la radiación remanente del átomo primigenio. Pero, ¿cómo sería esa huella de radiación?

Cuando el universo era muy joven y caliente, la radiación no podía viajar muy lejos sin que la absorbiese y emitiese alguna partícula. Este intercambio continuo de energía mantuvo un estado de equilibrio térmico; era improbable que una región cualquiera estuviese mucho más caliente o fría que la media. Cuando la materia y la energía se disponen en un estado así, se produce un espectro térmico, donde la intensidad de la radiación a cada longitud de onda es una función definida de la temperatura. De ahí que la radiación originada en el gran explosión caliente sea reconocible por su espectro.

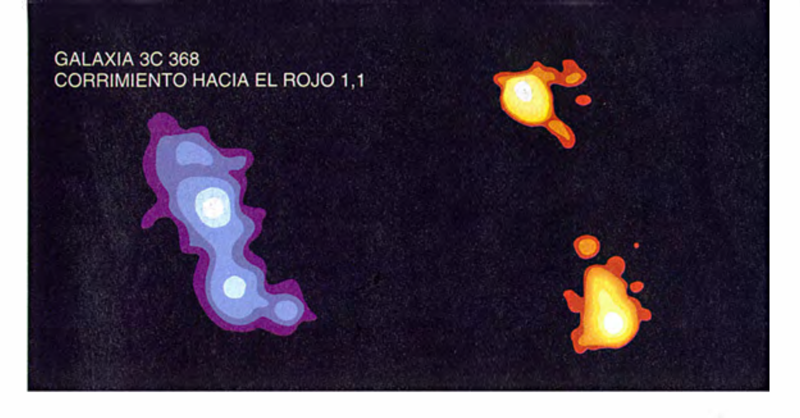
Y esa radiación cósmica de fondo se detectó. Mientras trabajaba en el desarrollo del radar —eran los años cuarenta—, Robert H. Dicke inventó el radiómetro de microondas, un dispositivo capaz de detectar bajos niveles de radiación. En los años sesenta, los laboratorios Bell emplearon un radiómetro en un telescopio que había de seguir a *Echo-1* y el *Telstar*, satélites de comunicaciones de la primera generación. El ingeniero que construyó este instrumento halló que detectaba una radiación inesperada. Arno A. Penzias y Robert W. Wilson la identificaron; se trataba de la radiación cósmica de fondo. Penzias y Wilson llegaron a esta idea movidos por la información de que Dicke había propuesto que debería usarse un radiómetro para buscar la radiación de fondo.

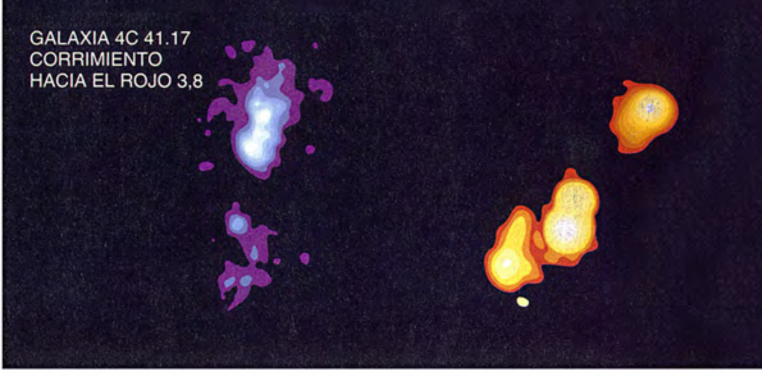
Al estudio de esa radiación se han dedicado el *Explorador del Fondo Cósmico (COBE)* y una serie de experimentos lanzados por cohetes, transportados por globos o radicados en tierra. La radiación cósmica de fondo tiene dos características. Primera: es casi igual en todas las direcciones. (Como George F. Smoot y su equipo descubrieron en 1992, varía sólo una parte en cien mil.) Ello significa que la radiación llena uniformemente el espacio, como predecía la cosmología de la gran explosión. Segunda propiedad: el espectro se parece mucho al de un objeto en equilibrio a 2,726 grados kelvin sobre el cero absoluto. Con seguridad, la radiación cósmica de fondo se produjo cuando el universo estaba mucho más caliente que 2,726 grados, pero ya se había anticipado que la temperatura con que aparecería la radiación sería baja. En los años treinta, Richard C. Tolman demostró que la temperatura del fondo cósmico disminuiría por la propia expansión del universo.

La radiación cósmica de fondo proporciona una prueba directa de la expansión del universo a partir de un estado denso y caliente, condición ésta necesaria para que se produzca la radiación. En efecto, en el universo primitivo, denso y caliente, las reacciones termonucleares crearon elementos más pesados que el hidrógeno: deuterio, helio y litio. De acuerdo con los cálculos realizados, la mezcla de los elementos ligeros coincide con las concentraciones observadas. Todos los indicios señalan, pues, que los elementos ligeros se generaron en el



5. LA DENSIDAD de los neutrones y protones del universo determinó las concentraciones de ciertos elementos. Para un universo de mayor densidad se calcula una abundancia de helio sólo un poco diferente, pero una concentración de deuterio bastante inferior. La región sombreada concuerda con las observaciones, y va de una abundancia del 24 por ciento de helio a una parte en 10^{10} del isótopo de litio. Esta concordancia cuantitativa es uno de los éxitos principales de la cosmología de la gran explosión.





universo caliente y joven; los elementos pesados aparecieron más tarde, producidos por las reacciones termonucleares que abastecen de energía a las estrellas.

La teoría del origen de los elementos nació de la fiebre investigadora subsiguiente a la segunda guerra mundial. George Gamow, Ralph A. Alpher y Robert Herman, entre otros, emplearon datos de la física nuclear para predecir qué tipo de procesos nucleares podrían haberse dado en los primeros tiempos del universo y qué elementos podrían haberse producido. Alpher y Herman también cayeron en la cuenta de que podía todavía detectarse alguna traza de la expansión original.

Estos trabajos pioneros, pese a varios errores de bulto, forjaron un vínculo entre la física nuclear y la cosmología. Se demostró que el universo primitivo constituía una suerte de reactor termonuclear. Partiendo de esa idea, se calcularon las concentraciones de elementos ligeros producidas durante la gran explosión y se siguieron las variaciones de esas abundancias en episodios del medio interestelar y en procesos nucleares estelares.

El que conozcamos las condiciones que prevalecieron en el universo primitivo no significa que dominemos la génesis de las galaxias. Disponemos, sin embargo, de algunas piezas del rompecabezas. Así, la gravedad fomenta el desarrollo de fluctuaciones de densidad en la distribución de la materia: retarda más la expansión de las regiones con mayor densidad, lo que, a su vez, aumenta la densidad de éstas. Observamos tal fenómeno en el crecimiento de los cúmulos próximos; las propias galaxias se constituirían por este mismo proceso, a una escala menor.

La presión de radiación impedía la formación de estructuras en el universo primitivo. Cambió la situación cuando se había expandido ya hasta alrededor de un 0,1 por ciento de su tamaño actual. La temperatura era entonces de unos tres mil grados kelvin, lo bastante fría para que los iones y los electrones se combinasen y creasen hidrógeno y helio neutros. La materia neutra podía atravesar sin obstáculos la radiación y desarrollar nubes de gas, de cuyo colapso nacerían cúmulos estelares. Cuando el universo tenía un quinto de su tamaño actual, la materia se había congregado en nubes de gas de magnitud suficiente para poderlas considerar galaxias jóvenes.

¿Cómo armonizar la uniformidad del universo primitivo con la distribución discrecional de galaxias en el universo actual? Sabemos que la densidad del universo primitivo no variaba mucho, pues sólo se observan ligeras irregularidades en la radiación cósmica de fondo. Resultaba hasta cierto punto fácil idear teorías coherentes con las mediciones disponibles, pero comienzan ya a emerger pruebas de contrastación bastante más finas. En particular, las teorías de la formación de galaxias predicen fluctuaciones bastante diferentes en la radiación cósmica de fondo a escalas angulares por debajo del grado; aunque no se han realizado todavía mediciones de fluctuaciones tan minúsculas, podrían conseguirse en la nueva generación de experimentos incoados. Habrá que ver entonces qué teoría sobre la formación de las galaxias resiste el envite de la prueba.

El universo actual ha dado a la vida, tal y como la conocemos, amplias oportunidades para desarrollarse: hay 10^{19} estrellas parecidas al Sol en la parte que podemos observar. De la cosmología de la gran explosión se sigue, sin embargo, que la vida sólo es posible en un intervalo temporal limitado: el universo era, en el pasado remoto, demasiado caliente, y en el futuro tendrá unos recursos restringidos. La mayoría de las galaxias producen aún nuevas estrellas, pero no es pequeño el número de las que agotaron su provisión de gas. Dentro de 30.000 millones de años, las galaxias serán mucho más ocuras y estarán llenas de estrellas muertas o moribundas. Habrá, pues, muchos menos planetas capaces de mantener la vida.

Si el universo no cesara nunca en su expansión, galaxias y estrellas acabarían volviéndose oscuras y frías. Frente a ese inmenso frío se levanta una hipótesis antagónica: la gran implosión. Sostiene ésta que, si la masa del universo adquiere cierto tamaño, la gravedad acabará invirtiendo la expansión, y toda materia y energía convergerán de nuevo. El asentamiento de una u otra hipótesis dependerá de lo que resulte del avance en las técnicas de medición de la masa del universo.

Esperamos que los nuevos experimentos que se vayan diseñando permitan entender mucho mejor el fenómeno de la gran explosión. El refinamiento en la medición de la velocidad de expansión y de las edades de las estrellas debería confirmarnos que las estrellas son más jóvenes que el universo en expansión. Por su lado, los grandes telescopios, terminados ya o en fase de construcción podrían revelarnos la forma en que la masa del universo condiciona la curvatura del espacio-tiempo, que a su vez influye en nuestras observaciones de las galaxias lejanas.

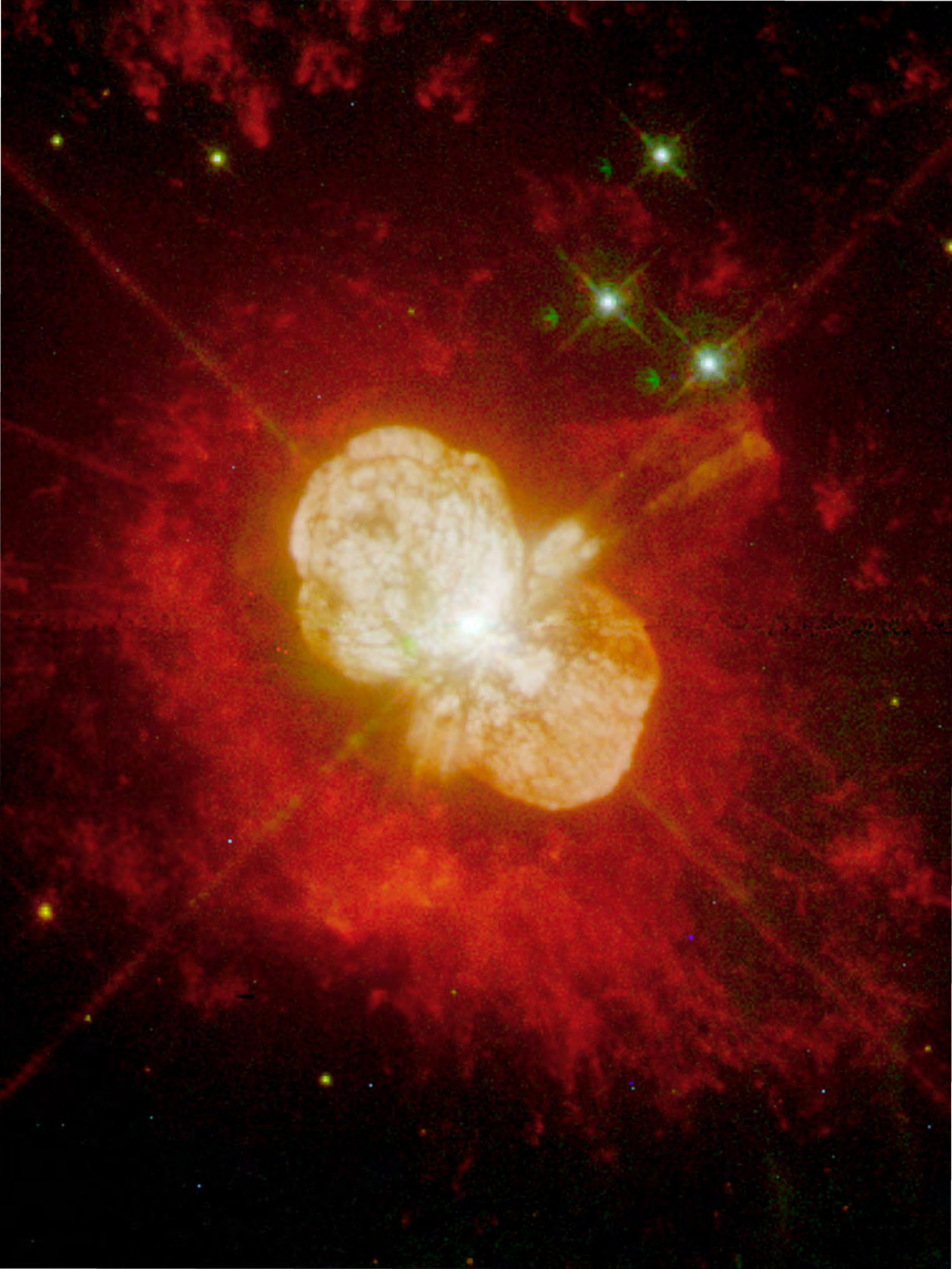
Pero las preguntas no se agotan en la cosmología de la gran explosión. Ignoramos por qué hubo una gran explosión o qué pudo haber antes. No sabemos si nuestro universo tiene parientes —otras regiones en expansión muy alejadas. No entendemos por qué las constantes fundamentales de la naturaleza tienen los valores que tienen. La teoría de la gran explosión está respaldada por abundantes indicios: explica la radiación cósmica de fondo, la concentración de elementos ligeros y la expansión de Hubble. Por tanto, es seguro que cualquier nueva cosmología incluirá el modelo de gran explosión.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

THE SHADOWS OF CREATION: DARK MATTER AND THE STRUCTURE OF THE UNIVERSE. Michael Riordan y David N. Schramm. W. H. Freeman & Co., 1991.

THE LIGHT AT THE EDGE OF THE UNIVERSE: ASTRONOMERS ON THE FRONT LINES OF THE COSMOLOGICAL REVOLUTION. Michael D. Lemonick. Villard Books, 1993.

PRINCIPLES OF PHYSICAL COSMOLOGY. P. J. E. Peebles. Princeton University Press, 1993.



Los elementos de la Tierra

Los elementos que constituyen la Tierra y quienes la habitan fueron creados por generaciones de estrellas que la precedieron

Robert P. Kirshner

La materia del universo nació de forma violenta. El hidrógeno y el helio surgieron del intenso calor de la gran explosión ("big bang"), hace unos 15.000 millones de años. Otros átomos más complejos, los de carbono, oxígeno, calcio y hierro, a partir de los cuales estamos hechos, se originaron en las ardientes profundidades de las estrellas. Los elementos más pesados, como el uranio, se sintetizaron gracias a las ondas de choque generadas en las explosiones de las supernovas. Los procesos nucleares que crearon estos pilares de la vida acontecieron en los ambientes más inhóspitos que cabe imaginar.

Violentas explosiones esparcieron los elementos, una vez formados, por el espacio interestelar. La atracción gravitatoria los moldeó en nuevas estrellas y planetas, y el electromagnetismo construyó con ellos las moléculas de la vida. La tinta de esta página, el aire que usted respira mientras la lee —por no hablar de sus huesos y de su sangre—, son el legado de generaciones de estrellas.

La materia se creó en una violenta explosión, hace unos 15.000 millones de años. En una pequeñísima fracción de segundo, los quarks, recién constituidos, se aglomeraron en protones y éstos, a su vez, se fusionaron para forjar núcleos de átomos de helio. Las fuerzas gravitatorias agrandaron las irregularidades existentes en esta primigenia sopa y aglutinaron las regiones más densas hasta dibujar un inmenso tapiz cósmico de galaxias y vacíos. A partir de las densas nubes de gas presentes en el seno de las galaxias nacieron las estrellas. Huellas de esas irregularidades iniciales subsisten en el fondo de radiación de microondas, donde todavía quedan huellas de la estructura del universo primitivo.

1. ETA CARINAE, una estrella cuya masa se supone es igual a 150 masas solares y que dista de la Tierra unos 10.000 años-luz, experimentó en 1841 una violenta explosión. Las imágenes del *Telescopio Espacial Hubble* muestran la existencia de dos penachos, constituidos por nitrógeno y otros elementos sintetizados en el interior de la estrella, que avanzan por el vacío interestelar a más de tres millones de kilómetros por hora. Algunos elementos que forman la Tierra proceden de descargas similares acaecidas en estrellas ancestrales.

Mientras el universo en su conjunto se desplegaba, se producía un cambio paralelo de la estructura microscópica de la materia. El carbono y el nitrógeno, así como otros elementos esenciales para la vida, se sintetizaron en el interior de estrellas ya desaparecidas. Los astrónomos investigan estos procesos evolutivos en el interior de nuestra galaxia, en las estrellas del cielo nocturno que contemplamos. A principios de este siglo, tales estudios tropezaron con la primera de una serie de paradojas relativas a las edades de estrellas y planetas.

El estudio de la radiactividad natural en la Tierra proporcionó las claves para determinar la edad de los distintos elementos. Midiendo la degradación lenta del uranio en plomo, los geofísicos calcularon para la Tierra una edad de unos miles de millones de años. Sin embargo, los astrofísicos de principios de siglo, que aún no conocían los procesos nucleares estelares, calcularon que un sol alimentado solamente por combustión química o contracción gravitatoria no podría mantener su brillo más allá de escasos millones de años.

La discrepancia era importante. Una edad para la Tierra de miles de millones de años proporciona un margen temporal mucho más verosímil para la evolución biológica y geológica, cuyos cambios son a menudo imperceptiblemente lentos. Curiosamente, la llave del problema se encontró en los mismos procesos de la física nuclear que, bajo la forma de radiactividad, plantearon el problema. Al ser de miles de millones de años la vida de las estrellas, se infiere que deben disponer de una fuente continua de energía, superior en un factor de 1000 a una fuente de energía química.

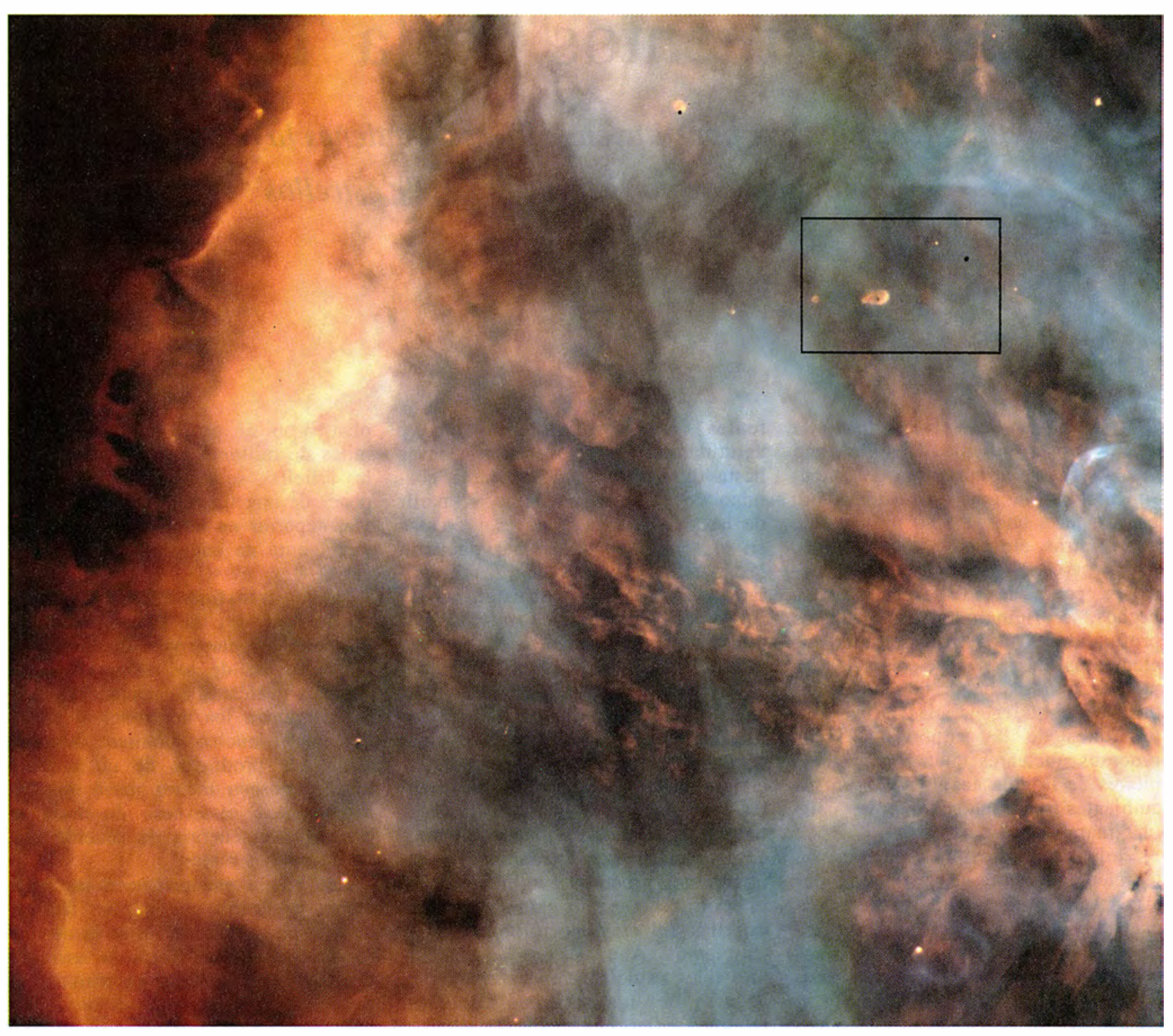
En las transformaciones químicas ordinarias, la fuerza eléctrica reordena los electrones de las capas más externas de los átomos; en los cambios nucleares, la interacción fuerte reorganiza los neutrones y protones en el núcleo atómico. Algunas veces los productos de un proceso nuclear poseen menos masa que los ingredientes; el exceso de masa se convierte en energía de acuerdo con la fórmula $E = mc^2$.

La energía que producen las reacciones nucleares es enorme, del orden de un millón de veces la de una reacción química. Hasta la terminología utilizada para los explosivos nucleares refleja esa circunstancia. La unidad de energía nuclear es el megatón, la energía de un millón de toneladas de explosivo químico.

Una estrella que quema nuclearmente el hidrógeno, pensemos en el Sol, contiene una reserva de energía muy grande, lo que le permite mantener su actividad durante unos 10.000 millones de años. Se calcula que el Sol tiene cerca de 5000 millones de años.

Las reacciones nucleares en el interior de las estrellas proporcionan una cantidad de energía superior a la necesaria para que la vida surja. Las cenizas de la combustión nuclear —los elementos de la tabla periódica— son los materiales constituyentes de los seres vivos. Y lo que quizás

ROBERT P. KIRSHNER dirige el departamento de astronomía de la Universidad de Harvard. Se dedica al estudio de las supernovas y de la astronomía extragaláctica.



2. CRIADERO DE ESTRELLAS de la Gran Nebulosa de Orión, a una distancia de 1500 años-luz (*arriba*). Esta figura, obtenida con el *Telescopio Espacial Hubble*, presenta de manera codificada la presencia de nitrógeno (*rojo*) y oxígeno (*azul*). Al menos la mitad de las estrellas jóvenes están rodeadas por discos de gas y polvo; se cree que, a partir de ellos, surgen los planetas. La imagen de la parte central ampliada muestra cinco estrellas jóvenes (*derecha*). Los discos protoplanetarios que están iluminados por estrellas calientes son brillantes. La estrella fría, ampliada (*extremo derecho*), tiene un quinto de la masa solar.

es más importante, que la fusión nuclear ocurra de manera estacionaria, a lo largo de la vida de una estrella, asegura un suministro continuo de energía durante miles de millones de años, con lo que hay tiempo suficiente para la eclosión de la vida y el desarrollo de la inteligencia.

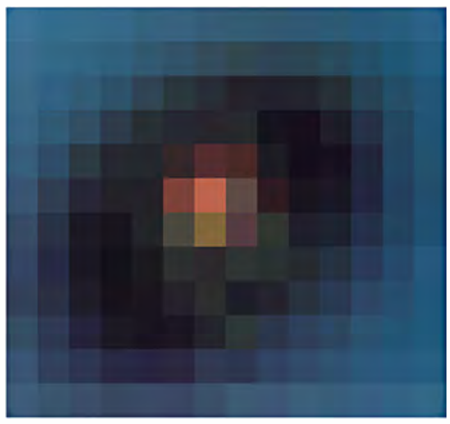
Después de todo, las estrellas no son unos lugares tan normales en el universo. Una estrella es una esfera gaseosa en la que existe un delicado equilibrio entre dos tendencias antagónicas: el empuje hacia dentro debido a la autogravitación y la presión hacia fuera de su interior caliente. El hidrógeno comprimido tiene usualmente la densidad del agua en el puerto de Boston, que es unas 10^{30} veces la densidad media del universo. Y en un universo con una temperatura media de 3 kelvin (–270 ºC), la zona central de una estrella (su núcleo) se halla a unos 15 millones de kelvin.

A estas temperaturas los átomos de hidrógeno han perdido sus electrones. Los protones desnudos, en sus rapidísimos recorridos por el denso interior de la estrella, experimentan frecuentes y violentas colisiones. En las proximidades del centro estelar la temperatura y la densidad son máximas. Allí, a pesar de su mutua repulsión electrostática, los protones se juntan tanto, que intervienen las interacciones nucleares fuerte y débil.

En una serie de reacciones nucleares, los núcleos de hidrógeno (esto es, los protones) se fusionan y dan núcleos de helio (constituidos por dos protones y dos neutrones), emitiéndose dos positrones, dos neutrinos y energía. Si la síntesis estelar hubiese terminado en la producción de helio (que también se generó en la gran explosión originaria) y éste hubiera permanecido confinado en el interior de las estrellas, no habría historia interesante que contar, ni nosotros estaríamos aquí. Tras una dilatada y estacionaria etapa de fusión del hidrógeno, en la que el helio se va acumulando en la zona central, la estrella experimenta un cambio drástico.

La zona central de la estrella se contrae y se calienta a medida que van encerrándose los nucleones de cuatro en cuatro en los núcleos de helio sintetizados. La temperatura y densidad del núcleo aumentan para





que se mantenga el equilibrio de presiones. Considerada globalmente, la estrella se hace menos homogénea. Mientras el corazón de la estrella mengua, las capas externas se hinchan hasta multiplicar por 50 su radio inicial. Una estrella del tamaño de nuestro sol se transformará rápidamente en una gigante roja, fría y luminosa. Desde el punto de vista local de los moradores de la Tierra, sería el fin de la historia y de todas las creaciones humanas.

En el interior de las gigantes rojas acontecen fenómenos muy interesantes. Con la contracción del núcleo estelar, el horno central gana en densidad y calor. Las reacciones nucleares, hasta entonces imposibles, se convierten en fuente principal de energía: el helio acumulado en la combustión del hidrógeno pasa a ser un combustible. A medida que la estrella envejece y aumenta la temperatura de la zona central, bastan contactos breves entre núcleos de helio para producir fusiones.

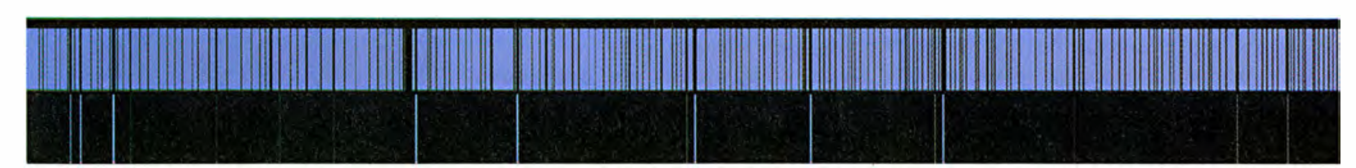
La colisión de dos núcleos de helio origina inicialmente una forma de berilio muy inestable, constituida por cuatro protones y cuatro neutrones. Otro núcleo de helio choca con este blanco efímero y se crea un núcleo de carbono. La síntesis del carbono es el resultado de una delicada coincidencia entre las energías del helio, el berilio inestable y el carbono resultante. Sin este proceso, no estaríamos aquí para contarlo.

El carbono y el oxígeno, este último originado por la fusión de aquél con un núcleo de helio, son los elementos que con mayor abundancia fabrican las estrellas. Las frecuentes colisiones entre protones y núcleos de helio apenas originan cantidades significativas de productos de fusión. El litio, el berilio y el boro, cuyos núcleos son más ligeros que el del carbono, son también un millón de veces menos abundantes que éste. Quiere decirse que las concentraciones de los elementos dependen de detalles a menudo oscuros de la física nuclear. Una estrella con una masa parecida a la solar mantiene la fase de gigante roja durante escasos centenares de millones de años. Los postreros estados de la quema del combustible son inestables: la estrella expulsa sus capas más externas, a partir de las cuales se forma una nebulosa planetaria. En algunas estrellas, la materia del núcleo, enriquecida en carbono, se desplaza convectivamente hacia las zonas exteriores, pudiendo escapar de la estrella para formar una especie de capullo de grafito. El combustible acaba por agotarse y el corazón o núcleo de la gigante roja experimenta una suerte de congelación, convirtiéndose en enana blanca.

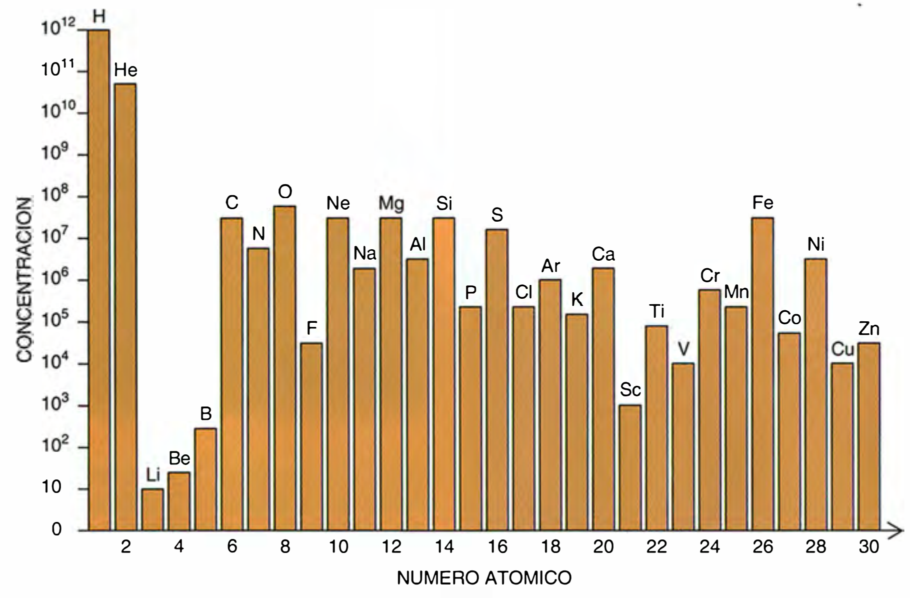
A una enana blanca no la protege del colapso gravitatorio la presión cinética de los gases, pues el carbono y el oxígeno de su interior se encuentran en un estado cuasi cristalino. La estrella equilibra la presión gravitatoria con la repulsión cuántica de sus electrones libres. La mecánica cuántica prohíbe que los electrones compartan el estado de energía más baja. En virtud de esa restricción, la mayoría de los electrones ocuparán estados energéticos más elevados aunque el gas electrónico esté relativamente frío; tales electrones son los causantes de la presión que equilibra el peso de la estrella. Cesan entonces la producción de energía nuclear y la síntesis de nuevos elementos.

Muchas enanas blancas de nuestra galaxia alcanzan ese estado anodino, se enfrían lentamente, se oscurecen y dejan de ser detectables. Algunas veces ocurre que una vecina demasiado generosa le cede a la enana un chorro de materia gaseosa y la transforma en una supernova del tipo I; gracias a ello se produce una síntesis súbita de nuevos elementos.

Sin embargo, las retortas principales de la alquimia nuclear se encuentran en las estrellas de masa mayor que la solar. El camino de las estrellas pesadas, no tan frecuentes, hacia su final es más corto e intenso. Para soportar el peso de las grandes capas externas, la presión y temperatura del núcleo tienen que subir muchísi-



3. EL ESPECTRO SOLAR exhibe líneas de absorción obscuras que coinciden con las líneas brillantes del espectro del hierro (*fondo*). Los átomos fríos de hierro absorben las mismas longitudes de onda de luz que emiten los calientes. Estos pares de líneas demuestran que la fotosfera solar contiene hierro, procedente de una estrella anterior.



4. CONCENTRACION RELATIVA DE ELEMENTOS en el universo. Nos revela los procesos que sintetizaron los elementos más pesados a partir del hidrógeno (H) y el helio (He) originados en la gran explosión. La fusión operada en las estrellas sintetizó más helio, saltó sobre el litio (Li), berilio (Be) y boro (B) hasta el carbono (C) y fabricó todos los demás hasta el hierro (Fe). Las estrellas de gran masa pueden forjar elementos más pesados que el oxígeno (O); estas estrellas terminan estallando en supernovas. Los elementos más pesados que el hierro se sintetizan en esas explosiones. El diagrama utiliza una escala logarítmica; la concentración sube en un factor de 10 por cada unidad de longitud. Por su escasez, los elementos más pesados que el zinc (Zn) no pueden representarse.

mo. Una estrella de veinte masas solares brilla 20.000 veces más que el Sol. Al recorrer su fase de fusión del hidrógeno unas mil veces más rápidamente, alcanza la fase de gigante roja en sólo diez millones de años, en lugar de los diez mil millones que empleará el Sol.

La elevada temperatura de la zona central insta una mayor diversidad de reacciones nucleares. Una estrella solar fabrica carbono y oxígeno que quedan encerrados en el frío rescoldo de una enana blanca. Dentro de una estrella de gran masa, los núcleos de carbono se fusionan creando neón y magnesio. La fusión del oxígeno origina silicio y azufre, y la del silicio fabrica hierro. Las etapas intermedias de las fusiones y desintegraciones radiactivas forman muchos elementos diferentes hasta llegar al hierro.

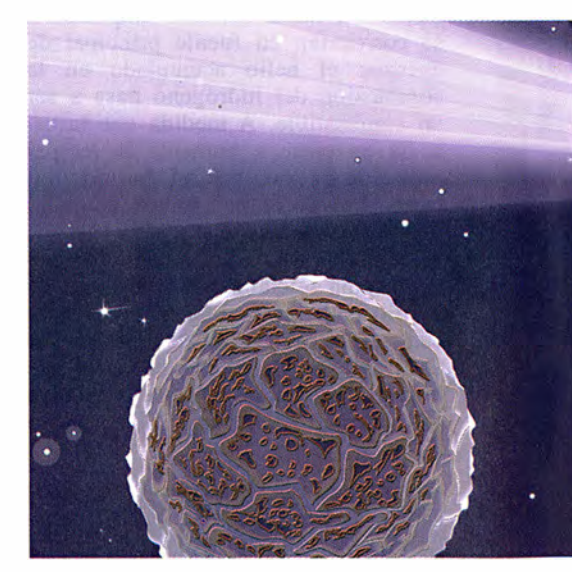
El núcleo de hierro ocupa una situación especial en la física nuclear y, por extensión, en la composición del universo. Es el núcleo más fuertemente ligado. En la fusión de los núcleos ligeros se desprende energía. Sin embargo, para fabricar un núcleo de mayor masa que el de hierro es necesario aportar energía. Este hecho, establecido en los laboratorios terrestres, es el causante de la muerte violenta de las estrellas. Una vez la estrella ha fabricado una zona central de hierro, no hay forma de generar energía mediante la fusión. La estrella, radiando energía a una velocidad asombrosa, se comporta como un adolescente con una tarjeta de crédito. Consume sus recursos a mayor velocidad que la que se necesitaría para reponerlos, y se pone al borde del desastre.

¿Qué sucede entonces? Para la estrella, el desastre toma la forma de una explosión de supernova. El núcleo estelar colapsa en un segundo y se convierte en una estrella de neutrones o un agujero negro. La materia de dicha zona central alcanza la densidad de los núcleos atómicos, y no se puede comprimir más. Cuando aún cae más materia sobre este núcleo central duro, rebota; una onda de presión intensa retumba a velocidad supersónica a través del volumen de la estrella. Al llegar a la superficie esta onda de choque, la estrella despide un intensísimo brillo y explota. Durante unas cuantas semanas, mientras la superficie emisora se expande a varios kilómetros por segundo, la luminosidad equivale a la de mil millones de soles. La energía total desprendida viene a ser la que podrá emitir el Sol durante toda su vida.

Estas explosiones de supernova —llamadas del tipo II— desempeñan un papel especial en el enriquecimiento químico del universo. A diferencia de las estrellas de masa pequeña cuyos productos quedan encerrados en las enanas blancas, las estrellas explosivas eyectan las capas más exteriores, que no se han consumido. Expelen el helio que se formó a partir de la combustión del hidrógeno y arrojan al gas entorno el carbono, el oxígeno, el azufre y el silicio, elementos que fueron acumulándose en el curso de las sucesivas fusiones.

En su avance a través de la estrella, la onda de choque va provocando la síntesis de nuevos elementos. El intenso calor desprendido desencadena reacciones nucleares que no pueden transcurrir en las combustiones estacionarias de las estrellas. Algunos de los productos de esas reacciones son radiactivos; se sintetizan también otros estables y más pesados que el hierro. Los neutrones bombardean los núcleos de hierro y los transforman en núcleos de oro. El oro se transmuta en plomo, y el bombardeo del plomo genera todos los elementos hasta llegar al uranio. En el cosmos escasean los elementos situados más allá del hierro en la tabla periódica. Así, por cada 100.000 millones de átomos de hidrógeno hay uno de uranio —fabricado cada uno con un coste especial en un lugar poco corriente.

Este cuadro teórico de la síntesis de los elementos pesados en explosiones de supernovas recibió pleno respaldo empírico en febrero de 1987. Una supernova, la SN 1987A, estalló entonces en la cercana Gran Nube de Magallanes. Sanduleak –69º 202, que en 1986 se registró como una estrella de 20 masas sola-



5. PSR B1257+12, púlsar que posee, al menos, tres planetas girando a su alrededor, los únicos conocidos fuera del sistema solar. Podrían ser fragmentos de una compañera binaria que tenía la estrella original antes de que explotara en

res, ya no existe. La relación entre la estrella y la supernova es una prueba espectacular de que la vida de una estrella de gran masa, al menos, ha terminado de forma violenta.

Los neutrinos emitidos desde lo más profundo del frente de la onda de choque se detectaron en Ohio y en Japón unas horas antes de que empezara a aumentar el brillo de la estrella. Los elementos recién sintetizados radian energía, lo que hace que los desechos de la supernova destellen y pueda así contemplarse el fenómeno a simple vista durante meses. Por medio de satélites y globos se detectaron los rayos gamma de alta energía que emitían los núcleos radiactivos recién engendrados.

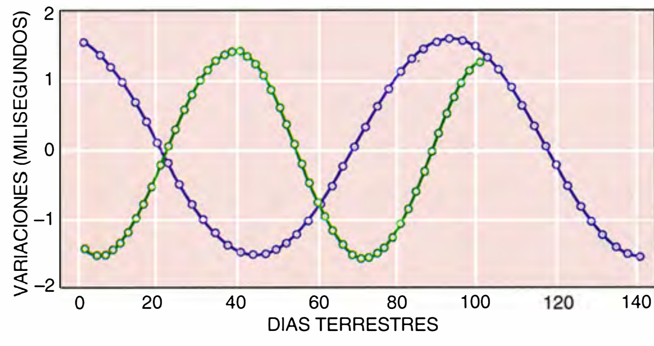
Las observaciones realizadas en 1987 por el *Explorador Internacional en el Ultravioleta* y posteriormente por el *Telescopio Espacial Hubble* ofrecieron pruebas vigorosas de que Sanduleak –69º 202 había sido una gigante roja que se desprendió de algunas de sus capas externas. Las imágenes obtenidas este año por el *Hubble* reparado revelaron, para nuestra sorpresa, la presencia de anillos alrededor de la supernova.

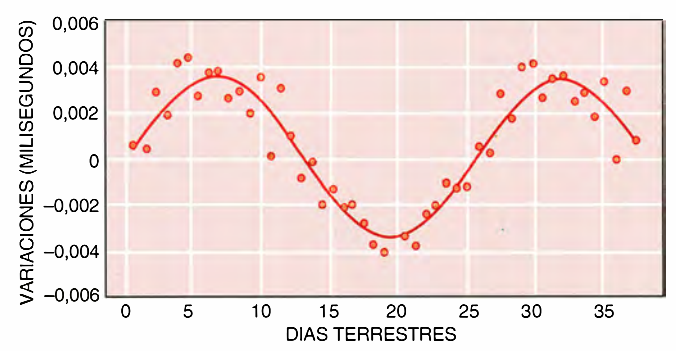
El anillo interno, excitado por la luz ultravioleta que emitió la supernova, está formado por materia que la estrella perdió cuando era una gigante roja. Mayor misterio envuelve a los anillos exteriores, aunque posiblemente estén relacionados con pérdidas de materia habidas en el sistema presupernova. Los productos de la combustión estelar se hallan concentrados en una mancha central (apenas resuelta con el telescopio *Hubble*), que se expande a 3000 kilómetros por segundo. No se ha observado ninguna estrella de neutrones en SN 1987A.

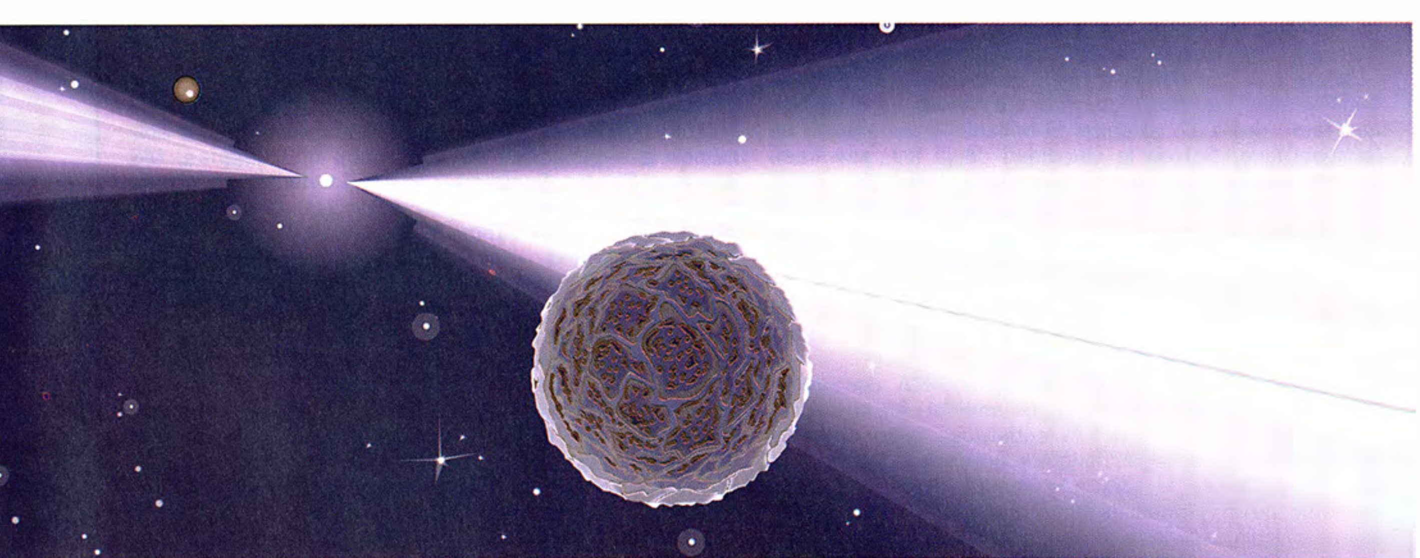
La supernova ha confirmado los modelos teóricos sobre el origen de los elementos. Los ciclos sucesivos de nacimiento y muerte de las estrellas enriquecen con elementos pesados el medio interestelar. Podemos identificar las sustancias presentes en el gas interestelar porque absorben determinadas longitudes de onda de la luz procedente de fuentes más lejanas (otras estrellas), dejando huellas características. Estas líneas de absorción también nos informan acerca de las concentraciones de los elementos, esto es, de sus cantidades comparadas con la del hidrógeno.

En una galaxia espiral, así la Vía Láctea, el gas interestelar se aloja de preferencia en los brazos. La presencia de polvo en el gas dificulta las observaciones ópticas, pues absorbe buena parte de la luz que lo atraviesa. Pero el polvo, al proteger de la luz ultravioleta los átomos de hidrógeno, favorece su combinación en moléculas (H_2). En estos recónditos remansos de la galaxia se acumulan otras moléculas: agua (H_2O), monóxido de carbono (CO) y amoníaco (NH_3). La variedad química es muy sorprendente; se han detectado más de cien moléculas diferentes en las nubes interestelares.

En mayo de este año, Yanti Miao y Yi-Jehng Khan detectaron el aminoácido más sencillo, la glicina, en una nube donde se forman estrellas situada cerca del centro de nuestra







supernova, destruyera su par y se transformara en púlsar. El púlsar se mueve de un lado a otro mientras los planetas lo orbitan; sus pulsos alcanzan la Tierra, a veces antes, a veces más tarde, revelando así la presencia de los planetas. Las gráficas muestran las variaciones en los tiempos de llegada a la Tierra de la radiación procedente del púlsar, separados en tres componentes. Las dos primeras variaciones (*izquierda*) son grandes, prueba de que se deben a planetas cuya masa triplica la terrestre y cuyos períodos orbitales son de 66,6 (*verde*) y 98,2 días terrestres (*violeta*). El tercer planeta, muy cercano al púlsar, produce una variación pequeña (*naranja*). Su masa es la centésima parte de la terrestre y su año es de 25,3 días.

galaxia, Sagitario B2. La presencia de aminoácidos y otras moléculas de interés bioquímico en los discos protoplanetarios que se acumulan cerca de una estrella en formación se presta a la cábala. En un planeta joven, el calor destruiría probablemente estas moléculas. Pero una vez se hubiese enfriado, otras moléculas de la misma clase podrían alcanzar su superficie gracias a los meteoritos. El año pasado se identificaron hidrocarburos complejos en partículas de polvo microscópicas originadas en el espacio interplanetario.

Examinando el bolígrafo que descansa sobre la mesa podemos aprender mucho sobre los materiales que formaron la Tierra. Constituido por compuestos de carbono y metales, el bolígrafo —y la misma Tierra— reproduce el patrón cósmico de la concentración de los elementos. Con la excepción del hidrógeno y del helio, que escapan con facilidad de las riendas gravitatorias de un planeta pequeño, los elementos de la Tierra son también los elementos del universo: fabricados por las estrellas y dispersos por la galaxia entera. (Carecemos de datos suficientes para determinar si la materia ordinaria, la constituida por las partículas subatómicas conocidas, es una pequeña fracción de la masa total del universo. En caso afirmativo, estaríamos hechos de una argamasa poco común.)

Mientras que el Sol es en un 99 % hidrógeno y helio, el 1 % de núcleos más complejos incluye trazas de hierro y de otros elementos pesados. Por tanto, el sistema solar hubo de formarse a partir de elementos creados en estrellas pertenecientes a generaciones anteriores. Hemos heredado el carbono y el oxígeno fabricados por estrellas ancestrales.

Examinando las estrellas de gran masa de nuestra galaxia, los astrónomos pueden ir dibujando el árbol genealógico del sistema solar. Si tales estrellas, dotadas de gran masa, de un cúmulo se están convirtiendo ahora en gigantes rojas, es que se trata de un cúmulo joven. Si las masas de las estrellas que se encaminan actualmente hacia la fase de gigante roja se parecen a la solar, el cúmulo tendrá edad suficiente para que sus estrellas semejantes al Sol hayan tenido tiempo de alcanzar dicha fase, unos 10.000 millones de años. Los cúmulos más viejos de nuestra galaxia son los globulares, cuyas edades, calculadas así, parecen estar comprendidas entre 12.000 y 18.000 millones de años.

Se admite que las estrellas de los cúmulos globulares pertenecen a generaciones tempranas. Las de más edad difieren bastante del Sol; las concentraciones de elementos como el hierro son cien, si no mil, veces inferiores a las del Sol. No obstante, hasta estas viejas estrellas contienen pequeñas concentraciones de elementos pesados, prueba de la existencia de una generación de estrellas nunca vista y de la que no queda ningún miembro.

De la edad del universo, cifrada en sólo unos 15.000 millones de años, se infiere que el enriquecimiento químico inicial de la galaxia debió de transcurrir con suma rapidez. (Hasta los cuásares, faros extragalácticos de un tiempo en el que el universo contaba un quinto de su edad actual, poseen carbono y nitrógeno.) Ha habido muchos menos cambios en tiempos recientes. Las abundancias químicas actuales en la materia interestelar son parecidas a las del Sol, selladas en su interior hace 5000 millones de años. Esa es la materia

La supernova 1987A y la edad del universo

El estudio de la Supernova 1987A permitió una inesperada, y rigurosa, comprobación de nuestra capacidad de medir las distancias cósmicas. Las estrellas y las galaxias remotas parecen alejarse de la Tierra, participando en la expansión cósmica que comenzó en la gran explosión. Si podemos medir la distancia a una galaxia, conociendo su velocidad de recesión, determinaremos el tiempo durante el cual ha estado alejándose. Y obtenemos así una medida de la edad del universo.

A partir de las observaciones realizadas a lo largo de 1987 y 1988, establecí con mis colaboradores el tiempo que tardó la luz en alcanzar el brillante anillo interno de la supernova. Sabida la velocidad de la luz, ese tiempo nos permitió calcular la dimensión física del anillo. Las observaciones desde el *Telescopio Espacial Hubble* en 1990 proporcionaron una medida del tamaño angular aparente del anillo, contemplado desde el sistema solar. Combinando estas dos informaciones se obtiene una distancia de la Gran Nube de Magallanes (donde sucedió SN 1987A) de unos 169.000 años luz, en buena concordancia con los métodos clásicos.

Para medir la distancia hasta SN 1987A desarrollamos un método independiente del anterior, en el que se analiza la luz emitida por la supernova poco después de la explosión. Cuando la onda de choque alcanzó la superficie calentó el gas y lo eyectó. A partir del corrimiento de las líneas de absorción de ciertos elementos se calcula la velocidad con la que avanzan esos desechos. Conociendo esta velocidad y el instante en que tuvo lugar la explosión de la supernova, se puede calcular el espacio recorrido por los desechos y, por tanto, el radio actual de la supernova. Dado el radio, tenemos el área de la superficie.

Consideremos a continuación una información de suma importancia. A partir del color global del gas podemos calcular la temperatura de la supernova, que proporciona la cantidad de luz que está emitiendo la supernova por unidad de su superficie. Puesto que ésta nos es conocida, podemos hallar la cantidad de energía radiada. Midiendo la recibida por la Tierra, disponemos de otra estimación de la distancia hasta SN 1987A. En una serie de cálculos de esta clase obtuvimos una distancia de unos 160.000 años-luz, en excelente acuerdo con el valor obtenido antes con los métodos astronómicos habituales.

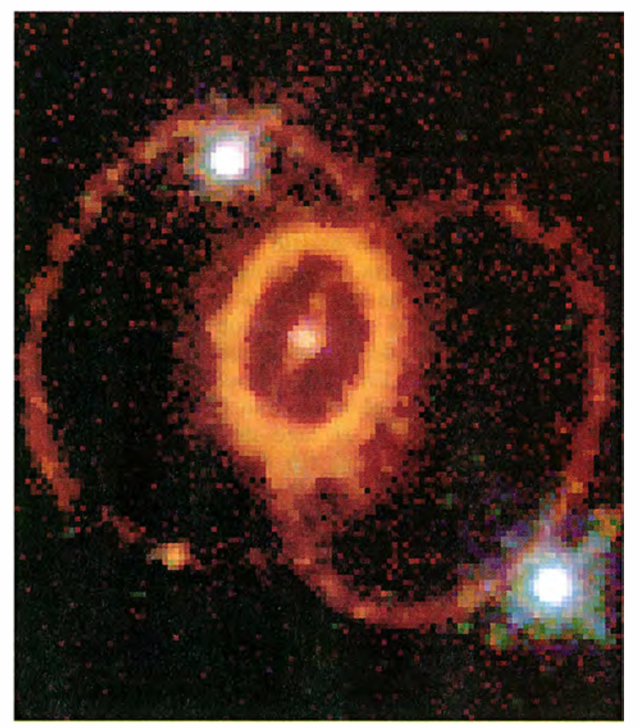
Animados por la respuesta “correcta” que ofrece este método cuando se trabaja con objetos cercanos, lo aplicamos a explosiones de supernova más lejanas. Mis alumnos Ronald Eastman y Brian Schmidt y yo acabamos de medir una docena de distancias de supernovas. Junto con los corrimientos hacia el rojo de las galaxias correspondientes, estas distancias proporcionan una edad para el universo comprendida entre 12.000 y 16.000 millones de años.

En estos cálculos se admite que la gravedad no ha frenado significativamente la expansión. Muchos cosmólogos sospechan que la masa del universo compensa la energía de expansión, frenando ésta hasta llegar casi a detenerla. En este caso, el universo tendría una edad de sólo dos tercios del valor inicial, que presupone una expansión constante. Por consiguiente, la edad corregida estaría comprendida entre 8000 y 11.000 millones de años.

Los cúmulos globulares, por otra parte, presentan edades comprendidas entre 12.000 y 18.000 millones de años. Para resolver la paradoja, habrá que esperar ulteriores mediciones que permitan determinar la desaceleración del universo. Resultaría embarazoso que los cúmulos globulares tuviesen una edad de 14.000 millones de años en un universo de sólo 7000 millones de años.

prima para la fabricación de futuros planetas y estrellas.

En las nubes de gas más cercanas a nosotros, la nebulosa de Orión, por ejemplo, los astrónomos pueden estudiar las escenas íntimas del nacimiento de las estrellas. Los modernos detectores de infrarrojos corren el velo que oculta estos criaderos de estrellas (aunque bloquea la luz visible, el polvo interestelar es transparente a la radiación infrarroja). Podemos ver la condensación de las estrellas recién nacidas antes incluso de que se inicie la fusión del hidrógeno en sus interiores profundos. Se espera que los grandes telescopios, como los Gémini de ocho metros de Hawai y Chile, proporcionen informaciones mucho más detalladas acerca del proceso de condensación de las estrellas.



6. LOS ANILLOS brillantes alrededor de SN 1987A están constituidos por material emitido en los comienzos de la vida de la estrella, calentado por la luz procedente de la explosión.

A medida que el gas va acumulándose para formar una estrella, lo primero en constituirse es un disco giratorio de gas y polvo. Mientras la estrella se condensa, el polvo se aglutina y crea planetas rocosos, como la Tierra. El gas remanente se acumula y origina grandes planetas gaseosos, como Júpiter. Mediante técnicas infrarojas y de radio, y ocasionalmente con métodos ópticos, se observa que los discos menudean. ¿Son planetas?

Las pruebas son mucho más débiles que la convicción. Igual que en cosmología, donde se da un único ejemplo de universo (estamos en él), sólo hay un sistema planetario bien conocido (el nuestro). Es difícil ver directamente un planeta. El observador tendría que detectar un objeto pequeño que brillaría con luz reflejada y se hallaría junto a otro mil millones de veces más brillante.

Para la detección de planetas se muestran más prometedores los efectos gravitatorios. Se trata de observar los cambios de la velocidad de una estrella visible producidos por un objeto invisible mientras los dos ejecutan un paso a dos estelar. El objeto, cuya masa será menor de una décima parte de la masa de la estrella, perturbará mínimamente el movimiento de ésta. Aunque hay indicios muy sugestivos, hasta ahora no se ha descubierto ningún planeta a través de la observación de los movimientos que pueda producir en la estrella luminosa alrededor de la que orbitase. Con las técnicas disponibles, no podemos descubrir planetas de masa inferior a la de Júpiter que giren alrededor de una estrella como el Sol.

Sin embargo, se ha mostrado hace poco que la estrella de neutrones rotatoria PSR B1257+12 tiene objetos que inducen corrimientos periódicos en su emisión. Cuando se origina una estrella de neutrones en la explosión de una supernova, el núcleo de aquélla se contrae en una densa esfera de pocos kilómetros de diámetro. Durante la contracción, cualquiera que sea la rotación de la estrella original se conserva en la estrella de neutrones. Por ello mismo, las estrellas de neutrones nacen dotadas de un movimiento de rotación. Si la estrella de neutrones posee un campo magnético, podría generar intensas ondas de radio y emitirlas en un haz estrecho orientado en determinada dirección.

Estos objetos existen. Se llaman púlsares. Cada vez que el radiofaro barre la Tierra, los astrónomos registran un pulso de radiorruido. Debido a que el mecanismo de emisión se halla solidariamente ligado a un denso volante, el período de esos pulsos es muy preciso. La observación diligente de los tiempos de llegada de los pulsos permite medir pequeñísimas variaciones entre ellos. Si el púlsar tiene un compañero invisible, se podrá comprobar que los tiempos de llegada de los pulsos se adelantan y luego se atrasan con la aproximación y alejamiento de la fuente.

En 1992 Alexander Wolszczan y Dale A. Frail comunicaron la existencia de variaciones periódicas en los tiempos de llegada de los pulsos procedentes del púlsar PSR B1257+12. La variación encontrada fue de sólo 1,5 milisegundos, y se mantuvo a lo largo de meses. Eso tiene sentido si admitimos un par de objetos que giraban alrededor de la estrella. Deberían poseer 3,4 y 2,8 veces la masa de la Tierra. En abril de 1994, hallaron señales de las fuerzas gravitatorias entre los planetas e indicios de un tercer objeto, con una masa parecida a la de la Luna.

Nadie se imagina un sistema solar como un residuo giratorio de una explosión de supernova que va lanzando intensas ráfagas de radio. Pero sólo un obstinado no llamaría planetas a sus objetos orbitales. No parece muy posible que sobrevivieran a la explosión de la supernova que creó la estrella de neutrones. Probablemente, la estrella original tenía una compañera binaria que ha desaparecido, y los planetas quizá se formaron a partir de sus despojos. Una historia nada habitual. Pese a todo, el estudio de los púlsares puede arrojar suficiente luz acerca del origen de nuestro planeta y otros de la misma índole.

La composición de la Tierra es un producto natural secundario de la generación de energía en las estrellas y de los sucesivos ciclos de nacimiento y muerte de estrellas en nuestra galaxia. Ignoramos si otras estrellas tienen planetas parecidos a la Tierra en los que átomos complejos formados en esas cocinas estelares se hayan autoorganizado finalmente en sistemas inteligentes.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

END IN FIRE: THE SUPERNOVA IN THE LARGE MAGELLANIC CLOUD. Paul Murdin. Cambridge University Press, 1990.

SUPERNOVAE AND STELLAR CATASTROPHE. Robert P. Kirshner *in Understanding Catastrophe*. Dirigido por J. Bourriau. Cambridge University Press, 1992.

THROUGH A UNIVERSE DARKLY: A COSMIC TALE OF ANCIENT ETHERS, DARK MATTER, AND THE FATE OF THE UNIVERSE. Marcia Bartusiak. HarperCollins, 1993.

Ciencia y sociedad

Paleontología humana

Los primeros europeos

Hasta finales de los años ochenta, la doctrina vigente en paleontología humana defendía que los homínidos llegaron a Europa al inicio del Pleistoceno medio, hace unos 800.000 años, procedentes de Oriente.

Pero a lo largo de la última década se han ido aportando nuevos elementos de discusión al debate, que contradicen este supuesto; así, las recientes dataciones absolutas de los fósiles de *Homo erectus* asiáticos y los hallazgos de restos humanos en el Pleistoceno inferior de Dmanisi (Georgia) [véase *"Paleoantropología europea. Raíz georgiana"*, de Louis de Bonis; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, septiembre de 1994]. Comienza, pues, a esbozarse una nueva interpretación espacio-temporal sobre la dispersión de nuestros antepasados. En este contexto revisten especial interés los hallazgos de restos humanos en los yacimientos del Plio-Pleistoceno de la región de Orce (Granada) y de Cueva Victoria (Cartagena).

Orce está situado en el sector nororiental de la cuenca intramontañosa de Baza, donde durante casi todo el Plio-Pleistoceno existió un lago, que posibilitó una sedimentación casi continuada en los últimos tres millones de años (m.a.) y, con ello, la fosilización de la fauna que vivía en su entorno. En el Pleistoceno superior, durante el transcurso de la última glaciación, el lago de Baza fue capturado por el río Guadalquivir, a través de su afluente el Guadiana Menor. La erosión producida por las aguas ha conformado una nueva red hidrográfica que, excavada sobre los sedimentos plio-cuaternarios, ha creado grandes cañadas y barrancos que permiten observar directamente una geología muy espectacular, con estratos plano-horizontales en los que los fósiles afloran por doquier.

Gracias a fenómeno tan singular, se han desenterrado una sucesión de yacimientos con fauna e industrias líticas que se sitúan en un intervalo de tiempo comprendido entre los 2 m.a. (Barranco del Paso-Cortijo Alfonso) hasta los 800.000 años (Puerto Lobo). Fenómenos geológicos de esta magnitud sólo se han puesto de relieve, hasta el momento, en el valle del Rift, en el oriente africano, donde han aparecido los restos humanos más antiguos.

El yacimiento de Venta Micena, el más importante excavado hasta la fecha en Orce, se formó hace aproximadamente 1,65 m.a. en una zona de charcas de agua dulce, situadas en medio de las llanuras de gramíneas que bordeaban el lago. Las últimas investigaciones nos indican que Venta Micena era un basurero producido por las grandes hienas cazadoras en el entorno de los cubiles donde se encontraban sus crías. Un origen similar puede atribuirse al yacimiento cárstico de Cueva Victoria.

La fauna de Venta Micena, la más abundante y diversa de todo nuestro continente, estudiada por uno de los autores (Martínez Navarro), consta de tres conjuntos de especies diferenciables en función de su origen. El primero está representado por las que evolucionaron en Europa durante el Villafranquiense (Plioceno superior); entre ellas, un elefante de gran tamaño *(Mammuthus meridionalis)*, un rinoceronte grácil *(Stephanorhinus etruscus)*, un tigre con dientes de sable *(Homotherium latidens)* y un oso (*Ursus etruscus).*

El segundo grupo integra a los inmigrantes procedentes de Asia, representados fundamentalmente por rumiantes: cuatro bóvidos [un búfalo de agua indio *(Bubalus* sp.), una especie con los cuernos extrañamente dirigidos hacia delante *(Soergelia minor)*, una forma emparentada con los actuales bueyes almizcleros *(Praeovibos* sp.) y un caprino *(Capra alba)*], dos ciervos [uno de grandes dimensiones *(Praemegaceros solilhacus)* y otro de tamaño mediano-pequeño ("Cervidae" del que no conocemos ni especie ni género)], un caballo adaptado a la carrera en espacios abiertos *(Equus* cf. *altidens,* según Vera Eisenmann) y un cánido *(Canis etruscus)*.

El tercer conjunto reúne a las especies cuyo origen se sitúa en Africa. Está compuesto básicamente por carnívoros, entre ellos una gran hiena *(Pachycrocuta brevirostris)*, un gran cánido *[Canis (Xenocyon) falconeri]* y un félido con dientes de sable del tamaño de un leopardo *(Megantereon whitei)*. Hay, además, un gran herbívoro *(Hippopotamus amphibius antiquus)* y, por último, el primer representante del género *Homo* que llegó a Europa. A esta fauna africana hay que sumar también la presencia de un cercopitécido de gran tamaño en Cueva Vic-



Fragmento craneal infantil de Orce (cara externa). *Corresponde a la región obélica e incluye parte de los huesos parietales, unidos por la sutura sagital, y la escama superior del hueso occipital, unida a los anteriores por las suturas lambdoideas. Su antigüedad es de 1,65 millones de años*

toria *(Theropithecus* cf. *oswaldi),* estudiado por el equipo de otro de los autores (Josep Gibert).

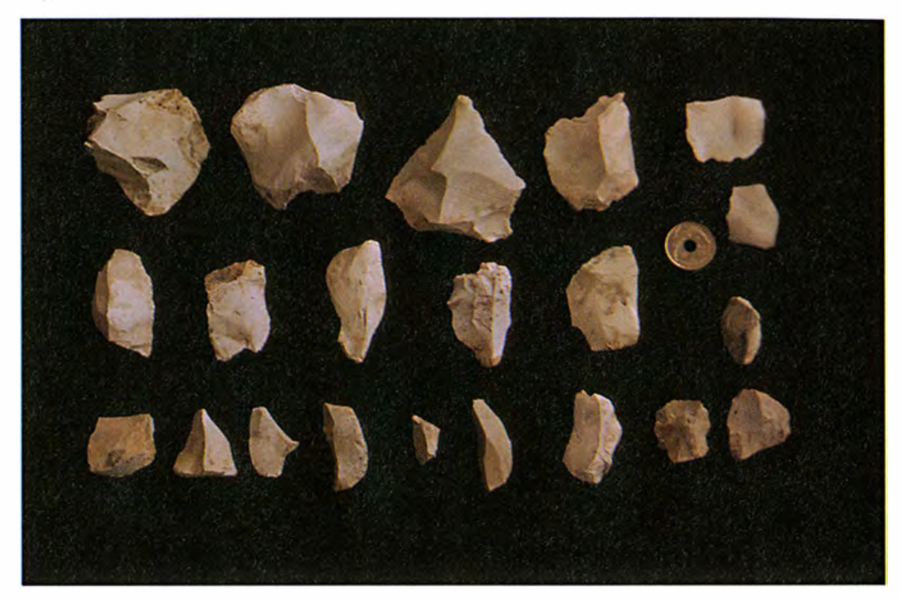
La presencia de fauna africana asociada a restos humanos en Venta Micena y Cueva Victoria constituye, sin duda, un hallazgo espectacular, que cambia muchas concepciones climáticas y faunísticas sobre este período de tiempo, contribuyendo a afianzar la idea de una colonización temprana del continente europeo por el hombre.

Desde una perspectiva paleoecológica, los estudios comparativos efectuados mediante técnicas de la estadística multivariante permiten deducir que estas especies formaban una comunidad similar a las actuales de las sabanas de hierbas altas y árboles espinosos de Africa, donde han persistido desde el Plioceno hasta nuestros días.

Desde 1982, las excavaciones efectuadas en Venta Micena han suministrado diversos fósiles de homínidos, consistentes en un fragmento craneal infantil de la región obélica y en dos diáfisis humerales, una de las cuales se encuentra completa y perteneció, casi con toda seguridad, al mismo individuo que el fragmento craneal. En Cueva Victoria se han encontrado una falange y varios fragmentos de diáfisis humerales de individuos adultos. Desgraciadamente, ninguno de estos fósiles permite diagnosticar el tipo humano al que pertenecieron.

La naturaleza humana del fragmento craneal de Venta Micena (VM-0) fue cuestionada en un comienzo. Tras un amplio estudio interdisciplinar, podemos ahora afirmar que dicha pieza corresponde a un homínido. Así, los trabajos realizados por Gibert, Campillo y sus colaboradores en el Instituto de Paleontología de Sabadell y la Universidad Autónoma de Barcelona han establecido la adscripción humana del fósil en función de su anatomía.

Gibert y Paul Palmqvist, de la Universidad de Málaga, han llegado a la misma conclusión aplicando los métodos de la moderna geometría fractal. El análisis consistió en estimar la dimensión fractal de las suturas craneanas, la cual toma valores intermedios entre 1 y 2 según su grado de recurvamiento. Ello permite caracterizar morfométricamente su complejidad relativa, pues las que tienen un contorno más sencillo y lineal toman valores cercanos a 1 (su dimensión euclideana), mientras que las más intrincadas y complejas obtienen valores próximos a 2 (lo que expresa el concepto de que una línea densamente arrugada puede rellenar un plano y constituye, en consecuencia, una superficie).



Industrias líticas en sílex del yacimiento Fuentenueva 3a. Son muy rudimentarias y tienen una antigüedad aproximada de 1,3-1,5 millones de años

Cuando se estimaron las dimensiones fractales de las suturas en diversas familias de mamíferos, se observó que esta pieza presenta un valor semejante al encontrado en los niños actuales y en los homínidos infantiles del Plio-Pleistoceno, mientras que existen diferencias muy significativas respecto a los ejemplares infantiles de otros grupos zoológicos, como los équidos y rumiantes, ya que en ellos las suturas son más recurvadas y, consecuentemente, muestran valores superiores en este parámetro.

Hubo un tercer enfoque complementario: el estudio inmunológico realizado por García Olivares y sus colaboradores, de la Universidad de Granada. Gracias al mismo se detectaron y caracterizaron albúmina y otras proteínas fósiles humanas en el fragmento craneal y en las diáfisis humerales, mediante el uso de anticuerpos monoclonales.

Por otra parte, junto a los escasos restos fósiles humanos han ido apareciendo en Orce señales diversas de la actividad de estos homínidos. Tales indicios consisten en industrias líticas muy rudimentarias en sílex, cuarcita y dolomías recristalizadas, localizadas en el Barranco del Paso-Cortijo Alfonso (1,9 m.a.), Barranco León 5 (1,75 m.a.), Venta Micena (1,65 m.a.) y Fuentenueva 3*a* (aproximadamente 1,5-1,3 m.a.), así como en otros yacimientos de datación por el momento más imprecisa (Fuentenueva 3*b* y Cortijo de Doña Milagros), estudiadas por Tixier, Roe y Turc. En Venta Micena se han encontrado, además, huesos y cráneos rotos por percusión; algunos de los cuales presentan estrías de descarnación, que dan fe de un modelo de alimentación basado en el aprovechamiento de la carroña.

Conviene precisar que ninguno de los fósiles hallados permite diagnosticar qué especie de homínido fue la primera en colonizar el norte del Mediterráneo. Sin embargo, en función de las edades tan tempranas que se están barajando y de la presencia de piedras talladas de manera rudimentaria, se puede emitir la hipótesis de que se trata de una especie anterior a *Homo erectus,* probablemente *Homo habilis.*

Todos estos hallazgos conducen a la necesidad de formular un nuevo cuadro de la colonización homínida de Eurasia, enmarcado en un amplio contexto paleogeográfico, paleoclimático y paleoecológico, que permitirá establecer las causas por las cuales el género *Homo* y un amplio grupo de grandes mamíferos salieron de Africa durante el Plioceno.

JOSEP GIBERT
Inst. de Paleontología de Sabadell
PAUL PALMQVIST
Universidad de Málaga
BIENVENIDO MARTÍNEZ NAVARRO
Museo de Prehistoria
y Paleontología de Orce

Neolítico

Uso del cinabrio

La preservación de restos humanos en la mayoría de los yacimientos arqueológicos está determinada por el medio en que se encuentran enterrados. Su conservación depende, pues,



Enterramiento dolménico de La Velilla (valle Valdavia, Palencia). Bermellón y ocre rojo destacan, por su color, de las tierras circundantes

del clima (local y regional) y de la composición de la tierra que les alberga. En el enterramiento dolménico de "La Velilla", en Osorno (Palencia), excavado por uno de nosotros (P. Zapatero Magdaleno) y de una antigüedad estimada en 5000 años, se han recuperado huesos humanos sepultados en cinabrio pulverizado (bermellón) que exhiben un excelente grado de conservación, pese a las condiciones climáticas desfavorables.

Nuestro hallazgo ha sido posible merced a las propiedades preservativas del sulfuro mercúrico (componente químico del bermellón), toda vez que esta especie mineral previene muy eficazmente la agresión destructiva de los microorganismos sobre los tejidos óseos.

El tipo de conservación observado en La Velilla constituye un ejemplo aislado, sin parangón en los enterramientos del Viejo Mundo en fechas tan tempranas, aunque se ha encontrado mercurio en una tumba egipcia del s. XVI a.C. y, también, en las tumbas de la cultura del Algar, del sureste de España. Para el Nuevo Mundo y, por consiguiente, para culturas ajenas a la dolménica, *Investigación y Ciencia* daba cuenta recientemente (en junio de 1994) de un enterramiento perteneciente al Sicán medio (900-1000 d.C.), donde los huesos humanos aparecieron recubiertos de una pintura de sulfuro mercúrico y un aglutinante.

Aparte de su antigüedad, el enterramiento de La Velilla muestra una circunstancia excepcional que justifica por sí misma que el mineral de mercurio fue depositado deliberadamente en el yacimiento: no había, que se sepa, mina alguna de mercurio en 160 kilómetros a la redonda. Por su parte, la cantidad de mineral empleada, varios quintales, pone de manifiesto la inversión de un gran esfuerzo.

El transporte de bermellón y su utilización subsiguiente sobre restos humanos nos mueve a pensar en la posibilidad de un conocimiento adelantado de las propiedades preservativas de este mineral. Arroja también luz sobre el mundo de las creencias de las poblaciones responsables del enterramiento de La Velilla. De cualquier modo, resulta obvio que existió algún tipo de amor o consideración para con los individuos enterrados, pues el acto de enterrar indica, por sí solo, cierto tratamiento respetuoso del cuerpo del difunto.

Según parece, sólo enterraban los cadáveres cuando la descarnación era completa o casi completa. Unido ello al número de individuos sepultados, superior al centenar, podría afirmarse que el dolmen constituiría un punto de referencia para la tribu. En efecto, la preservación de huesos con cinabrio confiere a este ritual de enterramiento características de presumible unicidad, lo que supone un nuevo aspecto cultural a considerar en futuras investigaciones.

Otros hechos que refuerzan la hipótesis de la peculiaridad ritual que postulamos son: una construcción singular en la que los diez grandes bloques pétreos que delimitan el dolmen en superficie descansan horizontalmente, y no verticalmente que es lo usual; la existencia de hogares fundacionales anteriores a la construcción del suelo del dolmen (preparado con calizas trituradas), y, por último, la presencia, junto a los restos humanos, de ídolos de hueso con aspecto particular (tipo espátula, trabajados en tibias de ovicápridos, decorados con temas geométricos o rasgos femeninos y también teñidos de rojo).

Pudiera objetarse que el cinabrio se empleó por error en vez del almagre u ocre rojo, con fines mágicos, es decir, para devolver a los huesos el color cálido de la sangre y la vida, y no para preservar los huesos. No parece tal. En La Velilla, el cinabrio no se mezcla con almagre; además, aparece pulverizado y lavado (es decir, como bermellón) y en mucha menos cantidad que el ocre rojo.

Es imposible que la brillantez, movilidad y no humectabilidad del mercurio retenido en el cinabrio mineral pudieran pasar inadvertidas al hombre primitivo que deambulaba por las minas de Almadén (Ciudad Real) o Riaño (León). También resulta improbable que en el curso de la preparación del bermellón dejara de experimentar las propiedades tóxicas (y en algunas ocasiones curativas) de los vapores mercuriales resultantes de la trituración del mineral. Incluso es razonable pensar que el habitante de La Velilla pudiera observar la superior capacidad preservante del cinabrio sobre el ocre rojo o almagre. Por consiguiente, parece más probable que el abundante y casi inerte almagre encontrado en La Velilla fuera un sustituto (o un excipiente) del cinabrio; no al revés.

JESÚS MARTÍN-GIL, FRANCISCO J. MARTÍN-GIL, GERMÁN DELIBES DE CASTRO, PILAR ZAPATERO Y F. JAVIER SARABIA
Universidad de Valladolid

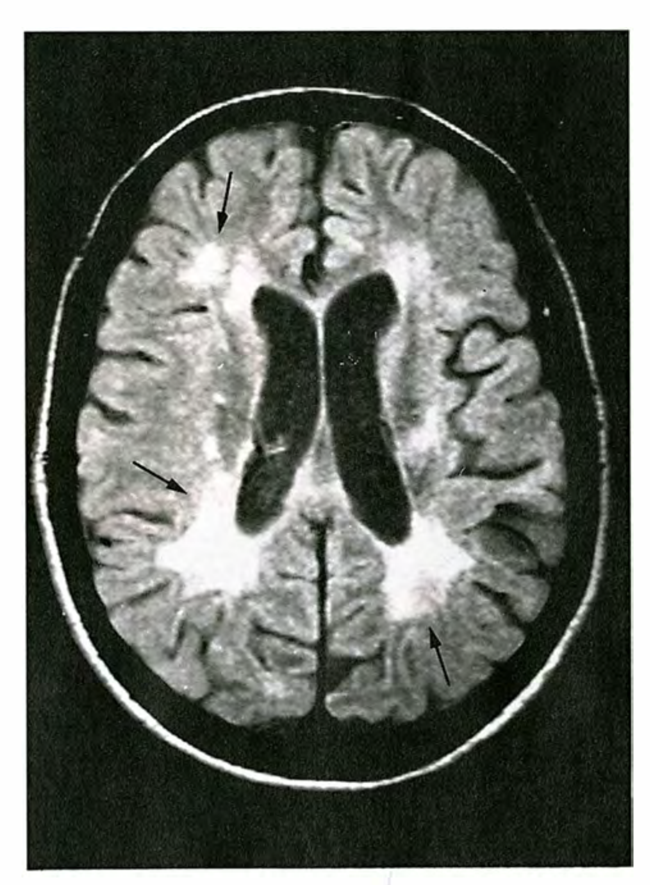
Esclerosis múltiple

Etiología y patogenia

El sistema inmunitario vela por la seguridad del organismo. Destruye los agentes extraños que puedan invadirlo (bacterias, virus y otros patógenos) o identifica y aniquila las células transformadas por un proceso tumoral. Tan sólo cuando dicho sistema se ve sobrepasado, se desarrolla la infección o el crecimiento del tumor. A veces, sin embargo, ese orden se trastoca, y los tejidos propios, considerados ahora extraños, son atacados en un alocado proceso de defensa del organismo contra sí mismo; así se originan las enfermedades autoinmunes. A este grupo pertenecen determinados tipos de diabetes, artritis y la esclerosis múltiple (EM).

La EM constituye la enfermedad crónica neurológica más frecuente en adultos jóvenes. (Es muy raro que comience después de los 45 años.) Se caracteriza por inflamación de áreas de la sustancia blanca del sistema nervioso central (SNC), en virtud de la invasión de linfocitos *T*, cuya misión genuina es la de identificar y destruir células infectadas. En la EM se registra también pérdida de la mielina que envuelve y aísla a las prolongaciones neuronales (axones), por culpa de lo cual se retrasa la conducción nerviosa, si no se bloquea. En consecuencia, se resiente la función de distintas áreas nerviosas y aparecen los síntomas de deficiencia neurológica.

Se ignora la causa real de la enfermedad. Parece haber cierta susceptibilidad genética, lo que no significa que se manifieste siguiendo una herencia mendeliana. Así, se ha comprobado que la esclerosis múltiple se desencadena con más frecuencia en las personas portadoras de ciertos antígenos de histocompatibilidad, como el HLA-DR2. Estos antígenos leucocitarios, que se transmiten de padres a hijos, son proteínas de la membrana de los linfocitos propios; intervienen en el intercambio de la información entre las células que conduce a la respuesta inmunitaria. Presumiblemente, el error en la elaboración y transmisión de dicha información desempeña un papel destacado en el comienzo de la enfermedad.



Resonancia magnética nuclear del cerebro de un paciente con esclerosis múltiple. Se aprecian lesiones en la sustancia blanca cerebral, de aspecto desmielinizante, que se distinguen fácilmente del tejido sano, de un tono más gris. Muchas de estas lesiones no originaban ningún síntoma en el enfermo

El estudio de la distribución geográfica de la EM sugiere la influencia activadora de un elemento externo al organismo. Se ha comprobado, por ejemplo, que la enfermedad aumenta su incidencia conforme nos alejamos del ecuador. En Queensland, al noreste de Australia, la frecuencia es un quinto de la incidencia en Tasmania, situada a unos 1000 km al sur; el riesgo de desarrollar esclerosis múltiple entre los inmigrantes ingleses que llegaron al sur de la isla dobla el peligro que corren los que emigraron al norte. Por lo demás, a los expertos en enfermedades infecciosas de origen vírico les es familiar esta relación más o menos directa entre incidencia y latitud geográfica. En apoyo de la tesis vírica se ha aducido también el aumento del número de afectos de EM en los archipiélagos del mar del Norte tras la instalación de los soldados británicos en la segunda guerra mundial; se supone que serían los portadores del virus causante de la esclerosis, que tendría un largo tiempo de incubación.

Varios equipos de investigación, incluido el nuestro del Hospital Ramón y Cajal de Madrid, han dedicado sus esfuerzos a la identificación del virus, o los virus, desencadenantes de la esclerosis múltiple. Se ha visto que las células del líquido cefalorraquídeo (que baña al sistema nervioso de los pacientes) producen anticuerpos de la clase IgG frente a una gama amplia de virus, entre los que destacan los del sarampión, rubeola y herpes zoster. Pero carecemos de pruebas concluyentes de que ninguno de ellos sea el causante de la EM: no se les ha encontrado de forma inequívoca en el tejido cerebral de los pacientes.

Pero las células del líquido cefalorraquídeo producen también anticuerpos contra distintos componentes de la mielina. Aunque estos anticuerpos no comiencen la enfermedad, pueden contribuir a mantenerla mediante su ataque contra proteínas antes ocultas en el tejido normal y ahora mostradas a los linfocitos, quienes las reconocen como extrañas, tras ser descubiertas al lesionarse el SNC por otro motivo.

El infiltrado inflamatorio de las lesiones activas del sistema nervioso está formado principalmente por linfocitos *T*, en particular CD4 coaduyuvantes ("helper"). En la sangre de los enfermos aparecen esos linfocitos sensibilizados frente a distintos componentes de la mielina; es decir, si se les enfrenta a esa vaina en el laboratorio, responden como si de un cuerpo extraño a abatir se tratara: segregan proteínas que, además de servirnos de marcadores de su activación, lesionan la mielina y los oligodendrocitos que la producen.

Los linfocitos necesitan atravesar la pared de los vasos para llegar de la sangre al tejido nervioso. Para ello, han de reconocer las moléculas de adhesión, proteínas del endotelio vascular (capa más interna) que, al actuar a modo de banderín de señales, indican cuándo y por dónde los linfocitos pueden atravesar las paredes de los vasos (principalmente vénulas). Esta migración a través de la pared vascular reviste tal interés, que su inhibición, por medio de anticuerpos dirigidos contra dichas moléculas, mitiga la "agresividad" de la encefalitis alérgica experimental, modelo realizado en el animal de laboratorio para conocer los mecanismos subyacentes bajo la esclerosis múltiple humana.

Una vez introducidos en el tejido nervioso, los linfocitos *T* se abren camino guiados por "señales" moleculares que ignoramos. Llegan así a la zona en donde células expertas (macrófagos entre otras) les presentan los antígenos. Entonces, los linfocitos, activados, dañan la mielina.

Los linfocitos *T* activados secretan diferentes citocinas, una clase de proteínas. Algunas potencian la activación de otros linfocitos; es el caso de la interleucina-2, que reclutará nuevas células que cooperarán en el proceso. Otras, como el factor de necrosis tumoral (FNT) secretado por los macrófagos, dañan los oligodendrocitos y la barrera endotelial, que permite así el paso indiscriminado de



Corte histológico de tejido cerebral de un enfermo con esclerosis múltiple. Se ha empleado una tinción que confiere a la mielina un color azul-violeta. Las flechas enmarcan un área desmielinizada que, por tanto, se ve blanquecina. (Cortesía de los Dres. Morales y Gutiérrez, de la sección de neuropatología del Hospital La Paz. Madrid.)

componentes de la sangre al tejido nervioso, lesionando la mielina. El FNT aumenta, además, la expresión de moléculas de adhesión, con lo que podrá reclutarse en el proceso un mayor número de linfocitos. El resultado será la presencia de áreas desperdigadas por la sustancia blanca del sistema nervioso central en las que la pérdida de la mielina origina alteraciones en la conducción del impulso nervioso. Estas lesiones son fácilmente identificables en el estudio histológico del cerebro y en las imágenes obtenidas por resonancia magnética nuclear (RMN).

El diagnóstico de la esclerosis múltiple ha de basarse en criterios clínicos muy definidos, pues las imágenes que nos ofrece la RMN, aunque indicativas, no son absolutamente diacríticas. El examen del líquido cefalorraquídeo, por su parte, puede confirmarnos si se ha producido una síntesis desmesurada de IgG, típica de la enfermedad.

El conocimiento de los datos que hemos enumerado ha permitido que, aunque no se disponga de un tratamiento curativo de la enfermedad, se consiga detener la progresión de la misma ofreciendo a los pacientes una calidad de vida prácticamente normal durante muchos años; ello se consigue con el empleo de fármacos inmunomoduladores y medidas de rehabilitación.

José Carlos Alvarez Cermeño
Hospital Ramón y Cajal, Madrid

Contaminantes nitrorgánicos

Eliminación bacteriana

Los compuestos nitroaromáticos se utilizan en la síntesis de colorantes, productos farmacéuticos, disolventes orgánicos, aceites lubricantes, cremas de zapatos y explosivos. Llámanse así porque presentan un grupo nitro (NO_2) en el anillo aromático, grupo que les confiere resistencia a la degradación biológica. Por esa razón, tales sustancias se numeran entre los contaminantes más difíciles de eliminar.

Sea por caso un explosivo común, el 2,4,6-trinitrotolueno, o TNT. La mayor impureza que se deriva de su síntesis reside en el 2,4-dinitrotolueno, un nitroaromático que sirve de materia prima en la síntesis de diisocianato de tolueno, que a su vez se emplea en la fabricación de poliuretano. Los desechos resultantes de la producción de estos y otros compuestos, amén del amplio uso de algunos herbicidas de base nitroaromática, como el Dinoseb, contaminan suelos, sedimentos marinos, lechos fluviales y lagos. Tóxicos y mutágenos, la eliminación de los nitroaromáticos se ha convertido en objetivo prioritario de diversas instituciones destinadas a preservar en buen estado el ambiente.

En el caso del TNT, su almacenamiento en polvorines desde el final de la segunda guerra mundial ha creado numerosos problemas en Estados Unidos y Alemania. La filtración del mismo al suelo y subsuelo por culpa de un embalaje deficiente ha desertizado los contornos. En algunas ocasiones las filtraciones han alcanzado acuíferos y aguas subterráneas destinadas al suministro de agua potable.

Se han ensayado diversos métodos —físicos, químicos y biológicos— para tratar la contaminación por nitroorgánicos tóxicos. Los tratamientos físicos incluyen la adsorción de estos compuestos en carbón activo, filtración e incineración. Las aproximaciones químicas han consistido en la extracción de los nitroaromáticos con solventes orgánicos o su precipitación con surfactantes; pero estas medidas, muy costosas, generan a veces productos más tóxicos que los de partida. Entre las medidas biológicas adoptadas destacan sistemas estancos —de tratamiento por lote de producción— y en continuo —tratamiento sin pausa de distintos lotes de producción—, el compostaje de suelos y los tratamientos de suelos con microorganismos; opciones que son más baratas y presentan menos riesgos para la salud humana y el medio. Pero los compuestos nitroaromáticos oponen bastante resistencia a su degradación por microorganismos.

Los anillos aromáticos sustituidos con grupos nitro resisten el ataque electrofílico por dioxigenasas, enzimas que activan el mismo, y ello se debe a las propiedades de atracción de electrones de los grupos nitro sobre el anillo aromático.

Sin embargo, no todos los nitroaromáticos oponen la misma resistencia a la degradación microbiana. Los nitrobenzoatos y los nitrofenoles, nitroaromáticos polares, son mineralizables, es decir, son convertidos en CO_2, agua y amoníaco, por bacterias gram negativas y positivas e incluso por levaduras. Por contra, los nitrotoluenos y nitrobenzenos, aromáticos no polares, se resisten a la degradación biológica, aunque parece haberse observado el metabolismo de algunos isómeros en cultivos puros y en plantas depuradoras de aguas residuales. En el caso de los aromáticos polisustituidos con grupos nitro, se ha encontrado que un gran número de microorganismos los biotransforman, a través de intermediarios nitroso e hidroxilamino, hasta las correspondientes aminas, que se acumulan en el medio reacios a cualquier degradación ulterior. Además, en condiciones aeróbicas se producen condensaciones de los anillos y se originan azoxytoluenos, que son altamente recalcitrantes.

La degradación biológica de los nitroaromáticos sólo puede considerarse completa cuando los grupos nitro se han eliminado del anillo aromático y el esqueleto carbonado se metaboliza hasta intermediarios anfibólicos, que se integran en los ciclos centrales del metabolismo celular; el esqueleto acaba eliminándose en forma de CO_2.

El tratamiento biológico de corrientes y suelos ricos en nitroaromáticos puede requerir la acción concertada de más de un microorganismo. Ocurre así en la degradación del insecticida DDT y los herbicidas Dalapón y Paratión. Pero sucede también que un solo microorganismo puede llevar a cabo la eliminación de uno o más nitroaromáticos, si convergen las actividades metabólicas necesarias.

Disponemos de tres vías para degradar los nitroaromáticos no polares: microbios capaces de utilizar estos compuestos como única fuente de carbono y nitrógeno, un consorcio de microorganismos que cometabolizan los nitroaromáticos hasta su mineralización y, por último, ensamblaje de diversos segmentos de rutas catabólicas en un solo microorganismo para conseguir la conversión del nitroaromático apolar en formas polares biodegradables, para los cuales existan rutas catabólicas en el hospedador.

Con técnicas de manipulación genética y optimización de las condiciones selectivas, hemos acelerado la evolución de nuevas rutas metabólicas. En particular, existen tres enfoques experimentales para reforzar las vías degradativas en el laboratorio: selección en quimiostatos, transferencia de genes *in vivo* y evolución *in vitro*. La selección en quimiostatos establece una presión selectiva a largo plazo para seleccionar microorganismos más eficientes en la utilización de un sustrato. La transferencia de genes *in vivo* recluta genes a través de los procesos genéticos de transformación, transducción y conjugación; son procesos de los que se vale la naturaleza para el intercambio de genes y, dado que muchas rutas catabólicas se localizan en plásmidos autotransmisibles, permiten la transferencia de genes catabólicos (degradantes) entre microorganismos. Por último, la evolución *in vitro* implica la clonación selectiva de genes y operones en vectores bien caracterizados, así como su transferencia a los hospedadores específicos. Las tres aproximaciones son vías utilizadas en la creación de nuevas rutas catabólicas.

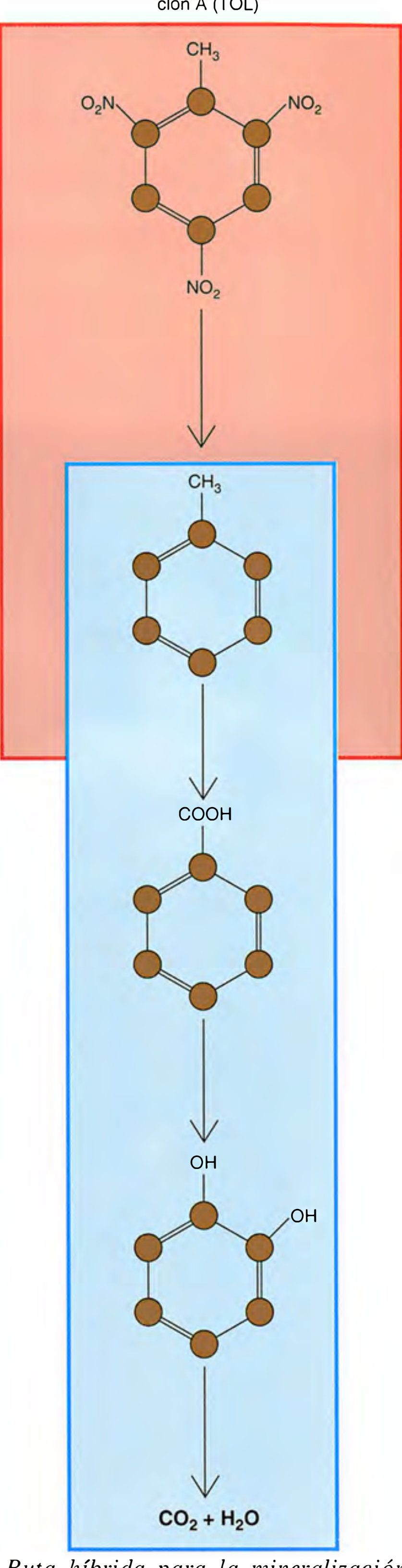
El grupo de degradación de tóxicos orgánicos de la Estación Experimental del Zaidín y Unión Española de Explosivos pusieron en marcha un programa encaminado a la eliminación global de contaminantes en las corrientes de desecho de una fábrica de producción de explosivos, TNT incluido. La investigación realizada condujo al aislamiento de una bacteria del género *Pseudomonas*, denominada clon C1S1, que utilizaba TNT como fuente de nitrógeno, pero no como fuente de carbono. En el proceso se acumulaba nitrito y se requerían concentraciones superiores a 20 miligramos por litro de TNT para que la bacteria utilizara este compuesto. A través de una serie de enriquecimientos seriados en sistemas estancos y en continuo se aisló un derivado, el clon A, que aprovechaba mejor este compuesto. En efecto, el clon A eliminaba TNT hasta por debajo de nuestros límites analíticos de detección (1 microgramo por litro).

En el proceso, que tenía lugar preferentemente en condiciones aeróbicas, no se acumulaba nitrito. La bacteria, además de TNT, utilizaba 2,4 y 2,6-dinitro y 2-nitrotolueno. Mediante análisis químicos se estableció que esta bacteria eliminaba progresivamente los grupos nitro del anillo aromático rindiendo tolueno, que no se aprovecha como fuente de carbono.

El plásmido TOL de *P. putida* codifica una ruta para la mineralización de tolueno, es autotransmisible y se replica en bacterias del género *Pseudomonas* del grupo I de ARNr, al que pertenece el clon A. Se transfirió, pues, el plásmido TOL al clon A y se aislaron transconjugantes de esta bacteria que utilizaban tolueno como fuente de carbono. (Un transconjugante es una bacteria que ha recibido genes de otra mediante transferencia por conjugación). Estos transconjugantes utilizan TNT como fuente de carbono y nitrógeno.

El microorganismo obtenido y el proceso de eliminación se encuentran protegidos en España por una patente perteneciente a Unión Española de Explosivos y de la que son inventores algunos de los autores del artículo. Este microorganismo es de interés para el tratamiento a escala industrial de efluentes de fábricas de producción de TNT, desactivación de munición fuera de servicio y tratamiento de suelos contaminados por TNT.

JUAN LUIS RAMOS, ESTRELLA DUQUE Y ALI HAIDOUR
Grupo de Degradación de Tóxicos Orgánicos. CSIC, Granada
JOSÉ MIGUEL OLIVA
Unión Española de Explosivos, Madrid



Ruta híbrida para la mineralización de TNT. La bacteria Pseudomonas *clon A porta el plásmido TOL pWW0. La conversión de TNT en tolueno se realiza a través de una ruta cromosómica de la bacteria clon A, mientras que la conversión de tolueno hasta CO_2 y agua viene determinada por el plásmido TOL*

La evolución de la Tierra

La formación de la Tierra y de su atmósfera dio origen a la vida, la cual condicionó el desarrollo subsiguiente de este planeta. Nuestro futuro se esconde en la interpretación de ese pasado geológico

Claude J. Allègre y Stephen H. Schneider



1. ESTA SECUENCIA DE IMAGENES DE LA TIERRA vista desde el espacio trata de reflejar los grandes cambios que ha experimentado. Cien millones de años después de su formación (hace unos 4350 millones de años) es probable que el planeta estuviera sometido al bombardeo de meteoritos (*izquierda*). En esa época quizás estaba tachonado de islas volcánicas y cubierto por una atmósfera cargada de dióxido de carbono y preñada de nubes. Hace tres mil millones de años su rostro se cubrió con una calima de metano, producto de los primitivos organismos (*centro*). Hoy, nubes, océanos y continentes son claramente discernibles (*derecha*). Esta ilustración se preparó con la ayuda de James F. Kasting.

Como el lapislázuli al que recuerda, el planeta azul envuelto en nubes que reconocemos inmediatamente en las imágenes tomadas por los satélites parece muy estable. Continentes y océanos, circundados por una atmósfera rica en oxígeno, sustentan formas de vida familiares. Sin embargo, esta constancia es una ilusión producida por la experiencia humana del tiempo. La Tierra y su atmósfera experimentan una alteración continua. La tectónica de placas impulsa la deriva de los continentes, hace ascender las montañas y mueve el suelo oceánico mientras que procesos aún no bien comprendidos alteran el clima.

Este cambio constante ha caracterizado a la Tierra desde su origen, hace unos 4500 millones de años. El calor y la gravedad fueron las fuerzas iniciales que condicionaron su evolución; a ellas fueron uniéndose poco a poco los efectos globales de la aparición de la vida. La exploración de este pasado nos ofrece la única posibilidad de comprender el origen de la vida y, quizá, su futuro.

La hipótesis más antigua sostenía que los planetas rocosos, entre ellos la Tierra, Mercurio, Venus y Marte, se habían creado por el rápido colapso gravitatorio de una nube de polvo, deflación que dio origen a una esfera densa. El programa espacial Apolo cambió este parecer en los años sesenta. El estudio de los cráteres lunares reveló que habían sido causados por el impacto de objetos que eran muy abundantes hace unos 4500 millones de años. Después, el número de impactos parecía haber disminuido muy rápidamente. Esta observación fortaleció la teoría de la acreción, propuesta por Otto Schmidt en 1944, según la cual los planetas fueron aumentando de tamaño de forma gradual, paso a paso.

Según este geofísico ruso, el polvo cósmico se agrupó para formar partículas, que a su vez se convirtieron en grava, la grava dio lugar a bolas pequeñas, luego a bolas grandes y a continuación a planetas diminutos, o planetesimales. Por último, el polvo adquirió el tamaño de la Luna. A medida que aumentó el tamaño de los planetesimales, o meteoritos, su número disminuyó, reduciéndose por consiguiente el número de colisiones entre ellos. El que hubiera menos elementos para la acreción significa que se tardó mucho tiempo en construir un gran planeta. Según un cálculo de George W. Wetherill pudieron transcurrir unos 100 millones de años entre la formación de un objeto con un diámetro de 10 kilómetros y otro del tamaño de la Tierra.

CLAUDE J. ALLEGRE y STEPHEN H. SCHNEIDER se dedican al estudio de diversos aspectos de la historia geológica de la Tierra y de su clima. Allègre es profesor de la Universidad de París y dirige el departamento de geoquímica del Instituto parisino de física planetaria. Schneider es profesor del departamento de biología de la Universidad de Stanford e investigador del Centro nacional de investigación atmósferica de Boulder, Colorado.



El proceso de acreción tuvo consecuencias térmicas importantes para la Tierra, que han influido mucho en su evolución. Los grandes cuerpos que embistieron contra el planeta produjeron un inmenso calor en su interior, fundiendo el polvo cósmico que allí había. El horno resultante (situado unos 200 a 400 kilómetros bajo tierra y denominado océano de magma) estuvo activo durante millones de años, dando lugar a erupciones volcánicas. Cuando la Tierra era joven, al calor causado en la superficie por el vulcanismo y por los ríos de lava procedentes del interior se sumaba el bombardeo constante de planetesimales enormes, algunos puede que del tamaño de la Luna o incluso de Marte. La vida resultaba imposible durante este período.

El programa Apolo no sólo sirvió para aclarar el origen de la Tierra por acreción, sino que obligó a intentar reconstruir su desarrollo físico subsiguiente. Esta empresa había sido considerada imposible por los fundadores de la geología, entre ellos Charles Lyell, a quien se atribuye la frase "ningún vestigio inicial, ninguna perspectiva final", en la que va implícita la idea de que no puede reconstruirse la etapa juvenil de la Tierra porque su misma actividad destruyó toda traza. Pero esta opinión se había visto superada por el desarrollo de la geología de los isótopos hacia las mismas fechas. Disparadas sus imaginaciones por los descubrimientos del Apolo y los hallazgos lunares, los geoquímicos empezaron a aplicar esta técnica a la comprensión de la evolución de la Tierra.

La datación de las rocas utilizando los denominados relojes radiactivos permite trabajar en terrenos antiguos que no contienen fósiles. Las manecillas de un tal reloj son los isótopos (átomos del mismo elemento con diferentes pesos atómicos) y el tiempo geológico se mide por la velocidad de desintegración de un isótopo en otro. Entre los muchos relojes existentes, los basados en la desintegración del uranio 238 en plomo 206 y del uranio 235 en plomo 207 son especiales. Los geocronólogos pueden determinar la edad de las muestras sólo con analizar el producto descendiente (en este caso, el plomo) del progenitor radiactivo, el uranio.

La geología isotópica ha permitido determinar que la acreción de la Tierra culminó en la diferenciación del planeta, con la creación del núcleo (fuente del campo magnético terrestre) y el inicio de la atmósfera. En 1953 Claire C. Patterson utilizó el reloj uranio-plomo en un trabajo clásico en el que estableció una edad de 4550 millones de años para la Tierra y muchos de los meteoritos que la formaron. Estudios recientes realizados con isótopos del plomo por uno de nosostros (Allègre) han proporcionado una perspectiva algo nueva. Como sostenía Patterson, algunos meteoritos se formaron en efecto hace unos 4560 millones de años y sus restos constituyeron la Tierra. Pero ésta siguió creciendo por bombardeo de planetesimales hasta después de transcurridos entre 120 y 150 millones de años más (hace entre 4440 y 4410 millones de años), momento en el que empezó a retener la atmósfera y a crear el núcleo. Esta posibilidad ya la habían sugerido hace un decenio Bruce R. Doe y Robert E. Zartman y concuerda con los cálculos de Wetherill.

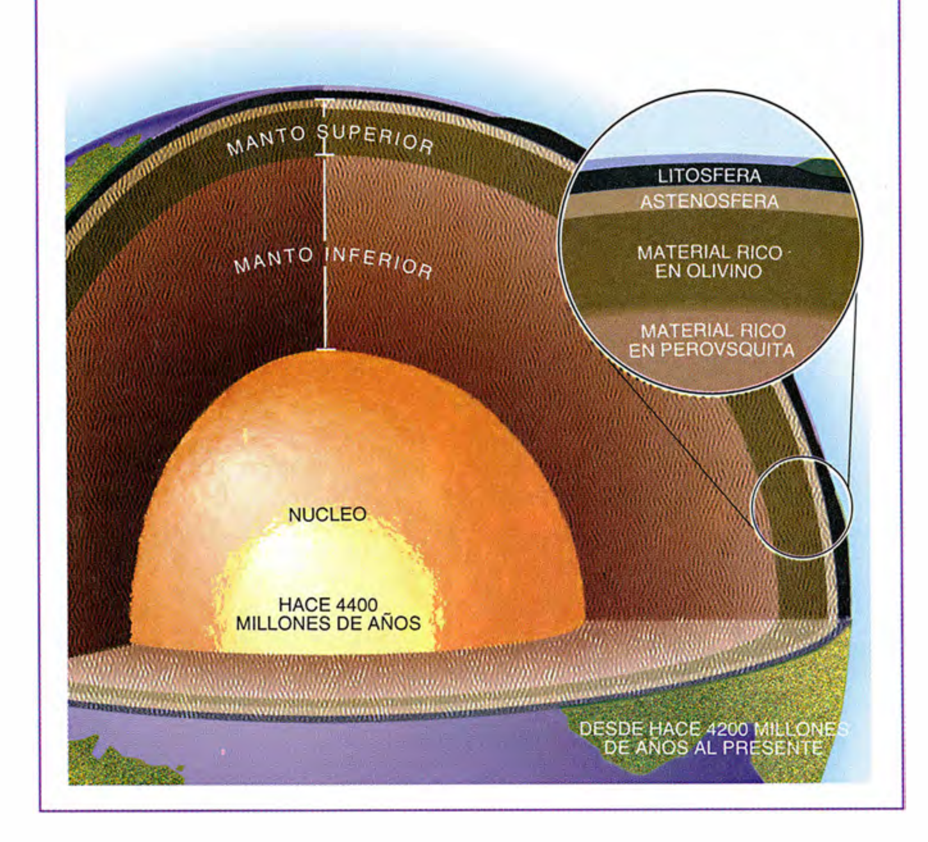
La aparición de los continentes fue algo posterior. Según la teoría de la tectónica de placas, estas masas de tierra son la única parte de la corteza terrestre que no se recicla y, por consiguiente, no se destruye durante el ciclo geotérmico impulsado por la convección del manto. Los continentes proporcionan así una especie de memoria porque puede leerse el registro de las primeras formas de vida en sus rocas. Testimonio que, sin embargo, no es amplio. La actividad geológica, que abarca la tectónica de placas, la erosión y la metamorfosis, ha destruido casi todas las rocas antiguas. Muy pocos fragmentos han sobrevivido a esta máquina geológica.

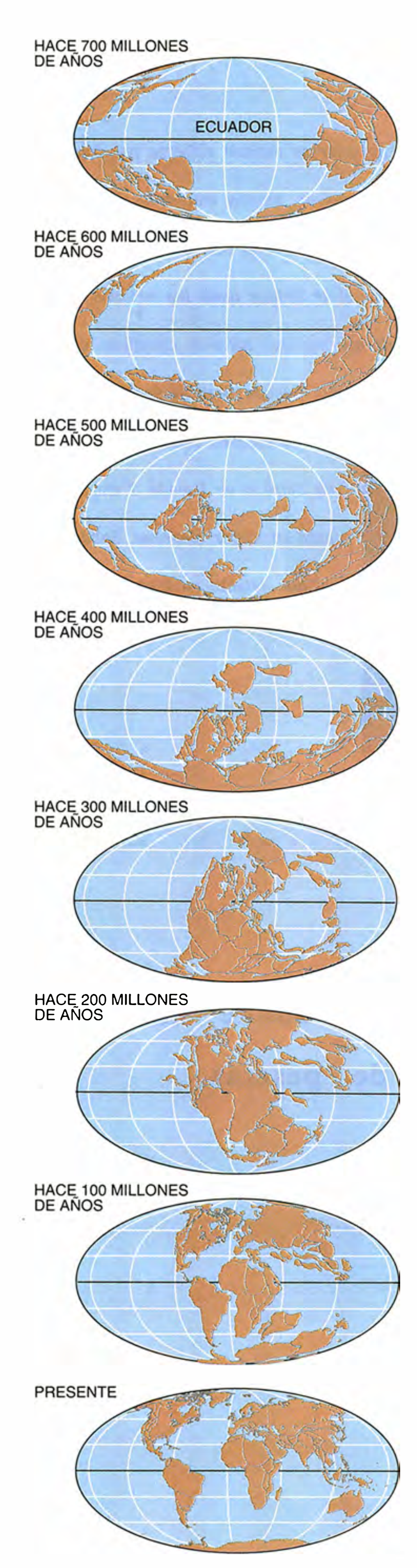
No obstante, en los últimos años se han hecho varios descubrimientos importantes, de nuevo utilizando isótopos. El grupo de Stephen Moorbath halló en el oeste de Groenlandia un terreno que tiene entre 3700 y 3800 millones de años. Y Samuel A. Bowring exploró una pequeña área de Norteamérica (el gneiss de Acasta) que tiene una antigüedad de 3960 millones de años.

Por último, la búsqueda del mineral circón llevó a otros investigadores a terrenos todavía más antiguos.

Formación del núcleo de la Tierra

La diferenciación del planeta tuvo lugar con bastante rapidez, tras su formación por acreción del polvo cósmico y los meteoritos. Hace unos 4400 millones de años apareció el núcleo (que, con el manto, impulsa el ciclo geotérmico, en el que participa el vulcanismo); los gases que emergían del interior del planeta dieron lugar a una atmósfera incipiente. Algo después se formó la corteza continental a medida que los diversos elementos se iban separando a profundidades diferentes.





2. LA DERIVA CONTINENTAL ha alterado el aspecto del planeta durante casi mil millones de años, como puede verse por las diferencias entre las posiciones actuales de los continentes y las de hace 700 millones de años. El superagregado de los primitivos continentes, o Pangea, se formó hace unos 200 millones de años y luego se separó a un ritmo que, en términos geológicos, fue muy rápido.

El circón, que se encuentra normalmente en las rocas continentales, no se disuelve durante el proceso de erosión, sino que se deposita en el sedimento en forma de partículas. Algunos fragmentos de circón pueden sobrevivir, por tanto, durante miles de millones de años y servir de testigos de la corteza más antigua del planeta. La investigación de los circones antiguos empezó en París con Annie Vitrac y Joël R. Lancelot y con las pesquisas de Moorbath y Allègre. Fue un equipo de la Universidad Nacional de Australia en Canberra, dirigido por William Compston, el que por fin tuvo éxito, pues descubrieron circones en el este de Australia que tenían entre 4100 y 4300 millones de años.

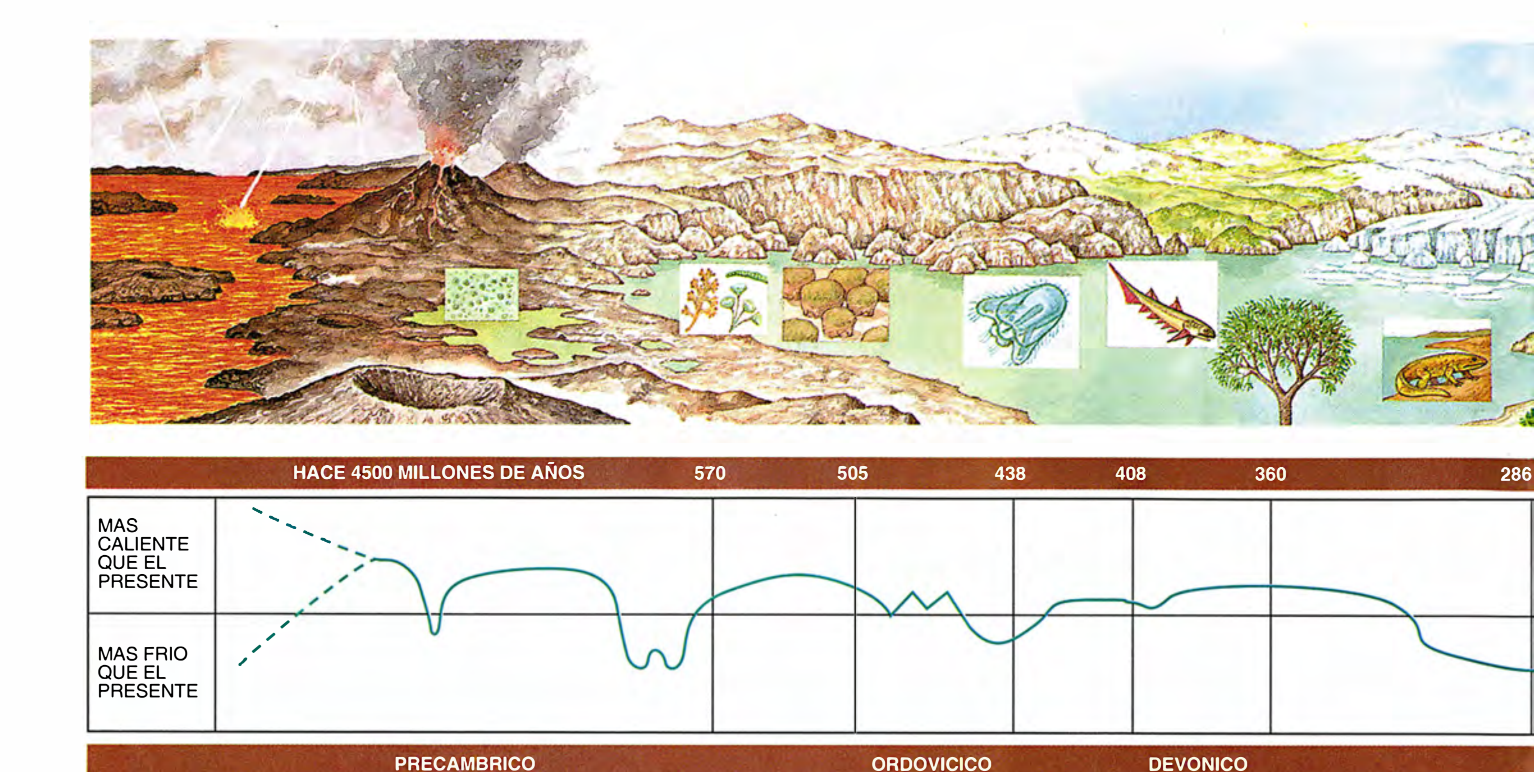
Estos minerales han sido cruciales, no sólo para conocer la edad de los continentes, sino también para determinar cuándo se inició la vida. Los fósiles más antiguos cuya edad no se discute se encontraron en Australia y en Suráfrica. Estas reliquias de algas verdeazuladas tienen unos 3500 millones de años. Manfred Schidlowski ha estudiado la formación Isua en el oeste de Groenlandia y sostiene que existía materia orgánica ya hace 3800 millones de años. Dado que la actividad geológica ha destruido la mayor parte del registro de la vida primitiva, no podemos decir con exactitud cuándo apareció por primera vez (quizá surgió muy deprisa, tal vez incluso hace 4200 millones de años).

Uno de los aspectos más importantes de la evolución de la Tierra es la formación de la atmósfera, porque es esta mezcla de gases la que permitió que la vida saliera de los océanos y se conservara. Desde el decenio de 1950 los investigadores han venido pensando que la atmósfera terrestre se creó a partir de los gases que emergían del interior del planeta. La expulsión de gases por un volcán constituye un ejemplo del proceso continuo que se denomina desgasificación de la Tierra. La pregunta es si esto ocurrió de forma súbita hace unos 4400 millones de años, cuando se diferenció el núcleo, o si se produjo de una forma más gradual con el paso del tiempo.

Para responderla, el equipo de Allègre estudió los isótopos de los gases raros (entre los que se cuentan el helio, el argón y el xenón), que tienen la peculiaridad de ser químicamente inertes, es decir, de no reaccionar con otros elementos de la naturaleza. Hay dos de especial importancia para los estudios atmosféricos: el argón y el xenón. El primero tiene tres isótopos, de los cuales el argón 40 se crea por desintegración del potasio 40. El xenón tiene nueve, entre ellos el 129, con dos orígenes diferentes: por un lado, surgió como consecuencia de nucleosíntesis antes de que se formaran la Tierra y el sistema solar; y, por otro, apareció por la desintegración del yodo 129 radiactivo, que ya no existe en la Tierra. Esta forma de yodo estuvo presente muy al principio, pero ha desaparecido desde entonces, y el xenón 129 ha aumentado a sus expensas.

La dificultad principal con que se enfrenta el investigador que quiera medir las proporciones de desintegración de estos elementos para usarlas como cronómetros es la de obtener cantidades suficientes de gases raros de las rocas del manto, por su escasez. Afortunadamente, en las dorsales mesoceánicas ocurre un fenómeno natural por el que la lava volcánica transfiere algunos silicatos del manto a la superficie. Las pequeñas cantidades de gases atrapados en los minerales del manto ascienden a la superficie con el magma y se acumulan en pequeñas vesículas en la capa cristalina externa de los ríos de lava. Este proceso concentra las cantidades de gases del manto por un factor de 10^4 o 10^5. La recuperación de estas rocas por draga del suelo marino y su trituración posterior al vacío en un espectrómetro de masas sensible permiten a los geoquímicos determinar las proporciones isotópicas del manto. Los resultados de estos cálculos son bastante sorprendentes: entre el 80 y el 85 por ciento de los gases que componen la atmósfera se expulsó en el primer millón de años; el resto se fue liberando lenta, pero constantemente, durante los 4400 millones de años siguientes.

La composición de esta atmósfera primitiva estaba dominada por el dióxido de carbono, siendo el nitrógeno el segundo gas más abundante. También había cantidades menores de metano, amoníaco, dióxido de azufre y ácido clorhídrico, pero no había oxígeno. Excepto por la presencia de agua en abundancia, la atmósfera era similar a la de Venus o a la de Marte. Se discuten los detalles de la evolución de la atmósfera original,



3. FLUCTUACIONES CLIMATICAS a lo largo del tiempo. Aunque el registro de temperaturas de la Tierra primitiva es bastante incierto, pueden hacerse cálculos aceptables desde hace unos 400 millones de años, que es cuando empieza a haber abundancia de fósiles. Conforme variaba el clima lo hacía también la vida. Las fechas de esas vicisitudes no están claras, pero su

sobre todo porque no sabemos cuál era la fuerza del Sol en aquella época. Algunos hechos, sin embargo, no se discuten, como el papel crucial desempeñado por el dióxido de carbono. Además, son muchos los que creen que aquella atmósfera en evolución contenía cantidades suficientes de gases del tipo del amoníaco y del metano para que se originase la materia orgánica.

Pero el problema del Sol sigue sin resolver. Según una hipóstesis, durante la era Arqueana, que duró aproximadamente desde hace 4500 millones hasta hace 2500 millones de años, la potencia del Sol era sólo un 75 por ciento de la actual, lo que plantea el dilema de cómo pudo mantenerse la vida en el clima relativamente frío resultante de un Sol más débil. Una solución a la denominada paradoja del débil Sol primitivo la ofrecieron Carl Sagan y George Mullen en 1970, proponiendo la abundancia de metano y amoníaco, que atrapan la radiación infrarroja con gran eficacia y pudieron haber creado un super-efecto invernadero. Pero se criticó la propuesta porque dichos gases son muy reactivos y sus vidas en la atmósfera son cortas.

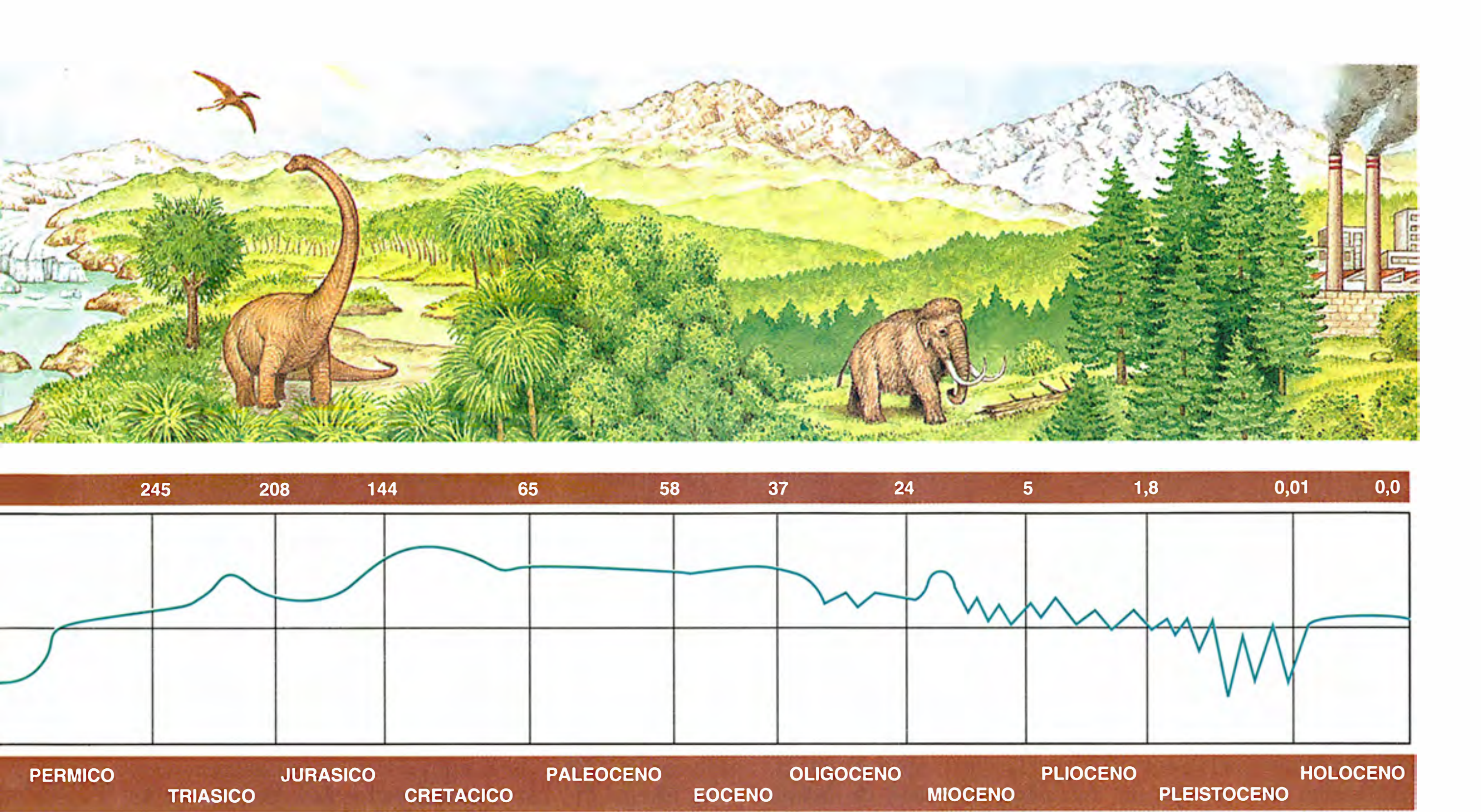
Algunos años después Veerabhadran Ramanathan, Robert D. Cess y Tobias Owen propusieron otra solución, según la cual no había necesidad de metano en la atmósfera primitiva porque habría abundancia suficiente de dióxido de carbono para producir el super-efecto invernadero. Pero esto planteaba la cuestión de cuánto dióxido de carbono había en la atmósfera primitiva. Ahora, el dióxido de carbono terrestre está enterrado en las rocas carbonatadas, como la piedra caliza, aunque no está claro cuándo quedó atrapado allí. En la actualidad el carbonato cálcico se crea sobre todo mediante actividades biológicas; en el período Arqueano, el carbono quizá se extrajera fundamentalmente por reacciones inorgánicas.

La rápida desgasificación del planeta liberó cantidades voluminosas de agua del manto, creando los océanos y el ciclo hidrológico. Los ácidos que probablemente había en la atmósfera erosionaron las rocas, formando rocas ricas en carbonato. Se discute, sin embargo, la importancia relativa de ese mecanismo. Heinrich D. Holland cree que la cantidad de dióxido de carbono de la atmósfera disminuyó rápidamente durante el Arqueano y se mantuvo a un nivel bajo.

Conocer el contenido de dióxido de carbono de la atmósfera primitiva es básico para entender los mecanismos de control climático. Dos facciones contrapuestas han manifestado sus ideas sobre el funcionamiento de este proceso. El primer grupo sostiene que las temperaturas y el dióxido de carbono globales estaban gobernados por retroalimentaciones geoquímicas inorgánicas; el segundo afirma que lo eran por la acción biológica.

James C. G. Walker, James F. Kasting y Paul B. Hays propusieron en 1981 el modelo inorgánico, según el cual los niveles del gas eran elevados al comienzo del Arqueano y no disminuyeron precipitadamente. Conforme el clima se hacía más cálido, se evaporaba más agua y aumentaba el vigor del ciclo hidrológico, incrementando la precipitación y la escorrentía. El dióxido de carbono de la atmósfera se mezcló con el agua de la lluvia para crear el aflujo superficial de dióxido de carbono, con lo que los minerales quedaron expuestos en la superficie a la acción de los elementos naturales. Los silicatos se combinaron con el carbono que había estado en la atmósfera, secuestrándolo en las rocas sedimentarias. Menos dióxido de carbono en la atmósfera significa, a su vez, menos efecto invernadero. El proceso de retroalimentación inorgánica negativa compensa el incremento de la energía solar.

Esta solución contrasta con un segundo paradigma: la extracción biológica. Una teoría avanzada por James E. Lovelock, uno de los creadores de la hipótesis de Gaia, suponía que mi-



orden es muy patente. Primero se formó una sopa primordial, luego surgieron organismos primitivos (algas, estromatolitos, medusas). Los peces óseos fueron seguidos por el ichthyostega, quizá la primera criatura que dio el paso del océano a la tierra. El resto de la historia es bien sabida: los dinosaurios aparecieron y se extinguieron, y su lugar lo ocuparon los mamíferos.

croorganismos fotosintetizadores, como los que componen el fitoplancton, serían muy productivos en un ambiente rico en dióxido de carbono. Esas criaturas extraerían lentamente el dióxido de carbono del aire y de los océanos, convirtiéndolo en sedimentos de carbonato cálcico. Los críticos replicaron que el fitoplancton ni siquiera había evolucionado durante la mayor parte de la existencia de la Tierra.

No hace mucho que Tyler Volk y David W. Schwartzman propusieron otra solución de tipo Gaia. Hicieron notar que las bacterias aumentan el contenido de dióxido de carbono de los suelos al descomponer la materia orgánica y generar ácidos húmicos. Ambas actividades aceleran la acción de los fenómenos naturales extrayendo dióxido de carbono de la atmósfera. Sobre este punto, sin embargo, la controversia se agudiza. Para algunos geoquímicos, entre ellos Kasting y Holland, los procesos inorgánicos bastan para explicar la mayor parte de la inmovilización, si bien la vida puede ser responsable de cierta extracción de dióxido de carbono tras el Arqueano. Consideran que la vida es un mecanismo estabilizador del clima bastante débil durante la mayor parte del tiempo geológico.

Durante mil o dos mil millones de años las algas de los océanos produjeron oxígeno. Pero, dado que este gas es muy reactivo y que había muchos minerales reducidos en los océanos antiguos (el hierro, por ejemplo, se oxida fácilmente), mucho del oxígeno producido por las criaturas vivas se agotó antes de alcanzar la atmósfera.

Aun cuando los procesos evolutivos hubieran dado lugar a formas de vida más complicadas durante esta era anaerobia, aquéllas hubieran carecido de oxígeno. Además, hay una gran probabilidad de que los rayos ultravioleta no filtrados procedentes del Sol las hubieran matado de haber abandonado los océanos. El oxígeno atmosférico se acumuló hace tan sólo dos mil millones de años, una vez oxidados casi todos los minerales reducidos del mar. Hace entre mil y dos mil millones de años el oxígeno alcanzó los niveles actuales, creando un nicho para la vida que evolucionaba.

Al examinar la estabilidad de ciertos minerales, como los óxidos de hierro y de uranio, Holland ha demostrado que el contenido de oxígeno de la atmósfera Arqueana, hace más de dos mil millones de años, era bajo. Se acepta en general que la proporción actual del 20 por ciento de oxígeno es consecuencia de la actividad fotosintética. Ahora bien, la cuestión es si el oxígeno atmosférico fue aumentando gradualmente o si lo hizo de forma súbita. Estudios recientes indican que el proceso se inició de forma brusca hace de 2100 a 2030 millones de años y que la situación actual se alcanzó hace 1500 millones de años.

La presencia de oxígeno en la atmósfera presentaba otra ventaja importante para un organismo que intentara vivir sobre la superficie: filtraba la radiación ultravioleta, que descompone muchas moléculas, incluidas las de ADN y de oxígeno. Dicha energía escinde el oxígeno a su forma atómica, O, muy inestable, que puede volver a combinarse en O_2 y en la molécula O_3, u ozono, tan especial. El ozono, a su vez, absorbe la radiación ultravioleta. La vida no tuvo siquiera la oportunidad de echar raíces o de poner pie en tierra hasta que el oxígeno de la atmósfera fue lo bastante abundante como para permitir la formación de ozono. No es una coincidencia que la rápida evolución de la vida, de los procariotas (organismos unicelulares sin núcleo) a los eucariotas (organismos unicelulares con núcleo) y a los metazoos (organismos pluricelulares), tuviera lugar en la era, que dura mil millones de años, del oxígeno y el ozono.

Aunque la atmósfera fue alcanzando un nivel bastante estable de oxígeno durante este período, el clima no era nada uniforme. Hubo largas etapas de calor o de frío relativos du-

rante la transición al tiempo geológico moderno. La composición de los caparazones fósiles del plancton que vivió cerca del suelo oceánico proporciona una medida de las temperaturas del agua del fondo marino, indicando que durante los últimos 100 millones de años las aguas del fondo se enfriaron casi 15 grados Celsius. Los niveles del mar cayeron cientos de metros y los continentes se separaron. Los mares interiores desaparecieron en su mayor parte y el clima se enfrío de 10 a 15º C como media. La acumulación de hielo permanente en la Antártida se inició hace unos 20 millones de años.

Hace de dos a tres millones de años el registro paleoclimático empieza a mostrar expansiones y contracciones significativas de los períodos cálidos y fríos, en ciclos de 40.000 años más o menos. Esta periodicidad es interesante porque corresponde al tiempo que tarda la Tierra en completar una oscilación de la inclinación de su eje de rotación. Hace tiempo que se venía especulando, y se ha calculado recientemente, que los cambios conocidos de la geometría de la órbita terrestre podrían alterar en más o menos un diez por ciento la cantidad de luz solar incidente y que podrían ser responsables del comienzo y el fin de los períodos glaciales.

Más interesante y desconcertante es el dato de que hace entre 600.000 y 800.000 años el ciclo dominante cambió, pasando de períodos de 40.000 años a intervalos de 100.000 años, con fluctuaciones muy grandes. La última gran fase glacial finalizó hace unos 10.000 años. En su punto culminante, hace 20.000 años, casquetes de hielo de kilómetro y medio de espesor cubrían gran parte del norte europeo y americano. Los glaciares se extendían por las altas mesetas y las montañas de todo el mundo. Se inmovilizó sobre la Tierra hielo suficiente para hacer que los niveles del mar cayeran más de 100 metros por debajo de los actuales. Las imponentes capas de hielo erosionaron la superficie terrestre y modificaron sus características ecológicas; la temperatrua media era 5º C más fría que la actual.

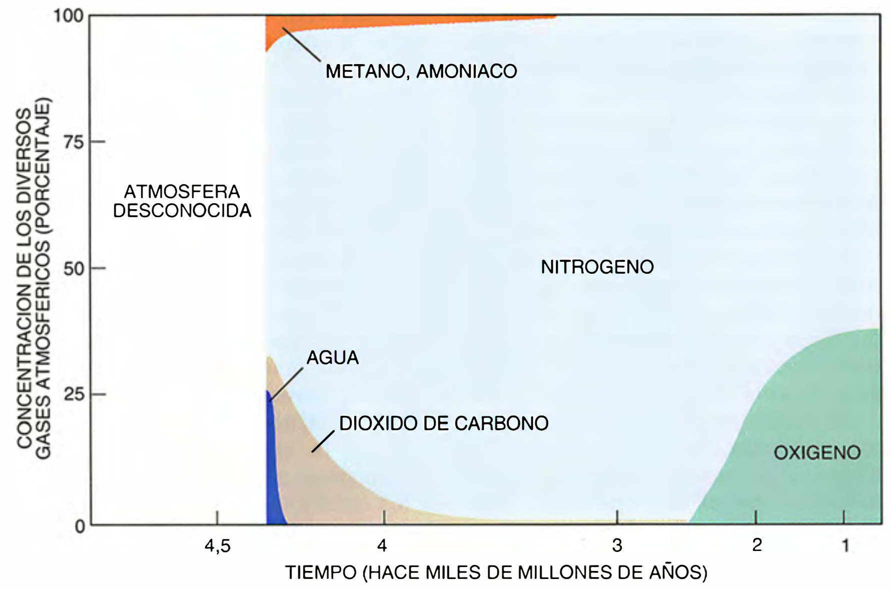
Las causas precisas de estos cambios no se han establecido todavía. Las erupciones volcánicas pueden haber desempeñado un papel significativo, como ponen de manifiesto los efectos de las recientes de El Chichón de México y el Monte Pinatubo de las Filipinas. Los acontecimientos tectónicos, como la formación del Himalaya, pueden influir en el clima mundial. Incluso el impacto de cometas puede afectar a las tendencias climáticas a corto plazo, con consecuencias catastróficas para la vida. Es notable, sin embargo, que el clima haya mostrado la amortiguación suficiente para sostener la vida durante 3500 millones de años pese a las violentas perturbaciones episódicas.

Uno de los descubrimientos climáticos más transcendentales de los últimos veinte años procede de los núcleos de hielo de Groenlandia y la Antártida. Cuando la nieve cae en estos continentes helados, el aire que queda entre los copos de nieve es atrapado en forma de burbujas. La nieve va contrayéndose gradualmente, junto con los gases capturados con ella, hasta formar el hielo. Algunos de esos registros pueden retroceder hasta hace 200.000 años y hoy puede analizarse el contenido químico del hielo y las burbujas de muestras procedentes de hasta 2000 metros de profundidad.

Así sabemos que el aire respirado por los antiguos egipcios y por los indios anasazi era muy parecido al que nosotros inhalamos hoy en día, salvo por lo que se refiere a los contaminantes introducidos durante los últimos 100 o 200 años. Destacan entre ellos el dióxido de carbono y el metano adicionales. El primero ha aumentado en un 25 por ciento como consecuencia de la industrialización y la deforestación; el último se ha duplicado a causa de la agricultura, el uso de la tierra y la producción de energía.

Los núcleos de hielo han demostrado que los cambios de la temperatura terrestre han ocurrido a un ritmo constante de alrededor de un grado Celsius por milenio, que, pese a todo, es lo bastante significativo como para haber alterado radicalmente el hábitat de las especies y haber contribuido en potencia a la extinción de una megafauna tan carismática como la constituida por los mamuts y los tigres de dientes de sable. Pero la historia más extraordinaria procedente de los núcleos de hielo no es la estabilidad relativa del clima durante los últimos 10.000 años, sino la de que parece que durante la culminación del último período glacial, hace 20.000 años, había entre un 30 y un 40 por ciento menos de dióxido de carbono y un 50 por ciento menos de metano en el aire de los que ha habido durante nuestro período, el Holoceno. Este dato sugiere una retroalimentación positiva entre el dióxido de carbono, el metano y el cambio climático.

El razonamiento sobre el que se basa la hipotética existencia de este sistema de retroalimentación desestabilizador es el siguiente. Cuando el mundo era más frío, había menos concentración de los gases que contribuyen al efecto invernadero, y, por tanto, se retenía menos calor. Con-



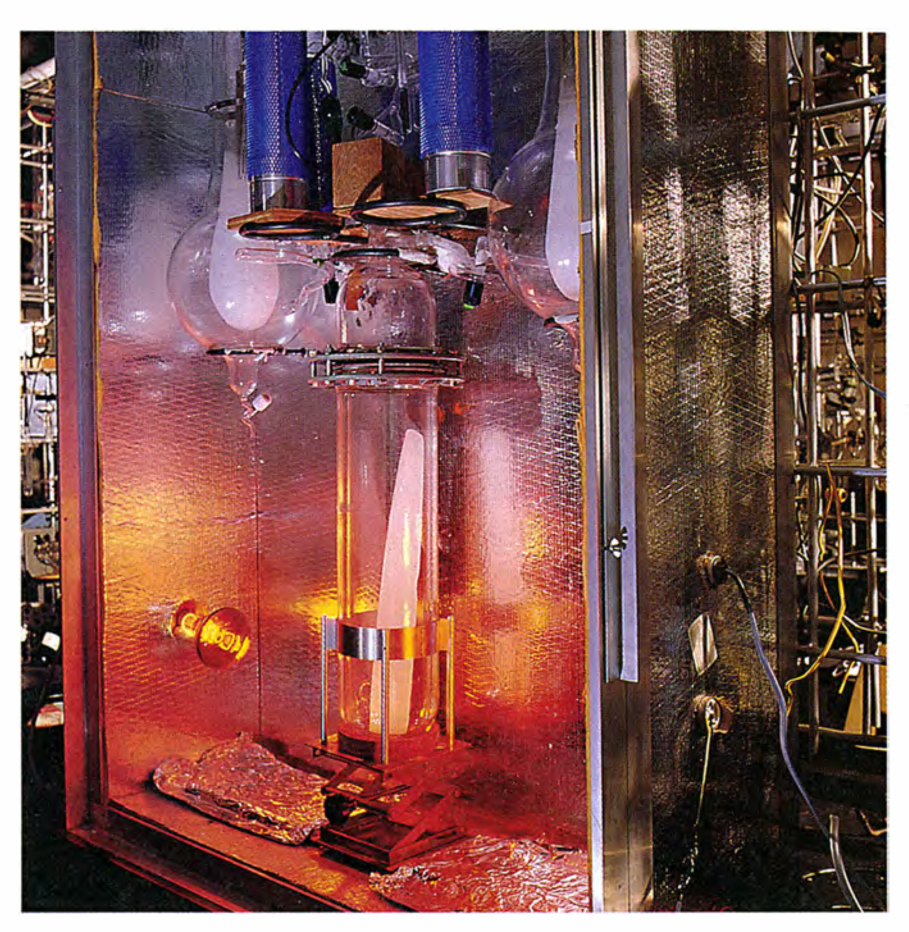
4. LA COMPOSICION ATMOSFERICA, mostrada por la concentración relativa de varios gases, se ha visto muy influida por la vida sobre la Tierra. La atmósfera primitiva tenía proporciones bastante elevadas de agua y de dióxido de carbono y, según algunos especialistas, de metano, amoníaco y nitrógeno. Después de la aparición de los organismos vivos, el oxígeno, tan vital para nuestra supervivencia, se hizo más copioso. En la actualidad, el dióxido de carbono, el metano y el agua sólo representan cantidades mínimas en la atmósfera.

forme la Tierra se calentó, aumentaron los niveles de dióxido de carbono y de metano, acelerando el calentamiento. Si la vida hubiera tomado parte en esta historia, habría sido para impulsar el cambio climático, más que para oponerse a él.

No obstante, la mayoría de los científicos coincidirían en que bien podría ser la vida el principal factor regulador de la retroalimentación positiva entre el cambio climático y los gases que contribuyen al efecto invernadero. Según una hipótesis, el mayor flujo de nutrientes procedente de las plataformas continentales, que quedaron expuestas al ir disminuyendo los niveles del mar, fertilizó el fitoplancton. Este aporte de nutrientes podría haber creado una mayor biomasa de esas especies marinas. Dado que los caparazones de carbonato cálcico constituyen la mayor parte de su masa, una mayor productividad extraería el dióxido de carbono de los océanos y, por fin, de la atmósfera. Al mismo tiempo, los bosques boreales, responsables del 10 al 20 % aproximado del carbono de la atmósfera, estuvieron diezmados durante los períodos glaciales. El carbono de estos bosques de altas latitudes podría haberse liberado a la atmósfera; sin embargo, el contenido atmosférico de este gas era menor entonces. Así pues, es posible que el sistema de retroalimentación positiva impulsado por la bomba biológica oceánica contrarrestase la retroalimentación negativa causada por la destrucción de los bosques. Grandes cantidades de carbono pueden almacenarse en los suelos, sin embargo; de modo que la desaparición de los bosques puede haber inducido el secuestro del carbono en el terreno.

Lo significativo es la idea de que la retroalimentación fuera positiva. Al estudiar la transición desde la atmósfera con alto contenido de carbono y bajo de oxígeno del período Arqueano hasta la existente en la era del gran progreso evolutivo, hace unos quinientos millones de años, resulta claro que la vida pudo haber contribuido a la estabilización del clima. Si consideramos otro caso —el de los períodos glaciales y los ciclos interglaciales— la vida parece haber tenido la función opuesta: acelerar el cambio antes que disminuirlo. Esta observación ha llevado a uno de nosotros (Schneider) a sostener que el clima y la vida evolucionaron a la vez, no que la última fuera un mero factor de retroalimentación negativa sobre el clima.

La teoría del confinamiento del calor (codificada en modelos climáticos matemáticos) indica que si los niveles de carbono se duplican a mediados del próximo siglo, el mundo se calentará entre uno y cinco grados Celsius. Si ocurriera el término medio de ese intervalo, el calentamiento se produciría a un ritmo de un grado por cada 100 años (diez veces más rápido que el ritmo medio histórico de cambio natural mundial, que ha sido de un grado por cada 1000 años). Si se diera el extremo más elevado del intervalo, los índices de cambio climático serían 50 veces más rápidos. El cambio realizado a este ritmo obligaría casi con toda certeza a muchas especies a intentar mover sus zonas de distribución, exactamente como hicieron en la transición del período glacial al interglacial hace entre 10.000 y 15.000 años. No sólo las especies tendrían que responder al cambio climático a velociades de 10 a 50 veces más rápidas, sino que pocas tendrían rutas de migración abiertas, no alteradas, como ocurrió al final del período glacial y comienzo de la era interglacial. Estas son las razones por las que es esencial saber si la duplicación del dióxido de carbono calentará la Tierra en uno o en cinco grados más.



5. LOS NUCLEOS DE HIELO procedentes de Groenlandia y de la Antártida han proporcionado un pequeño muestrario de la historia atmosférica de la Tierra. A medida que la nieve se comprime para formar hielo, las burbujas de aire se quedan atrapadas entre los copos. Analizando los gases de estas diminutas cámaras, puede determinarse la composición que tenía la atmósfera hasta casi 200.000 años atrás.

Para hacer las proyecciones del cambio climático futuro necesarias para entender el destino de los ecosistemas de este planeta debemos perforar la tierra y el hielo y dragar el mar hasta descubrir todos los registros geológicos, paleoclimáticos y paleoecológicos que podamos. Son ellos los que proporcionan el telón de fondo contra el cual calibrar los pobres instrumentos que hemos de usar para escudriñar un futuro ambiental sombrío, sobre el que influimos cada vez más.

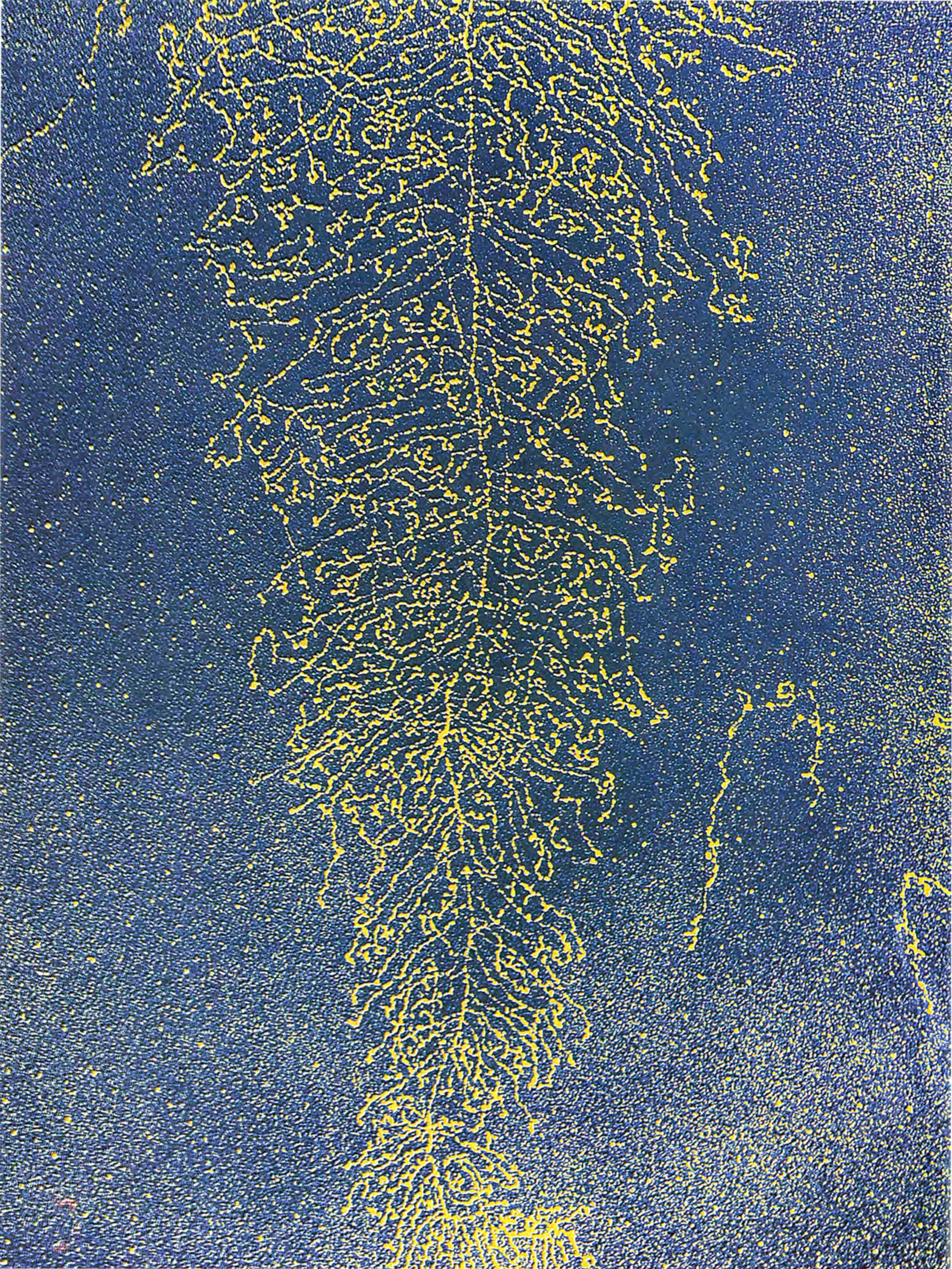
BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

HOW TO BUILD A HABITABLE PLANET. Wallace Broecker. Lamont-Doherty Geological Observatory Press. 1990.

SCIENTISTS ON GAIA. Dirigido por Stephen H. Schneider y Penelope J. Boston. MIT Press, 1991.

FROM STONE TO STAR: A VIEW OF MODERN GEOLOGY. Claude J. Allègre. Harvard University Press, 1992

EARTH'S EARLY ATMOSPHERE. James F. Kasting en *Science*, vol. 259, páginas 920-926; 12 de febrero de 1993.



Origen de la vida sobre la Tierra

Se multiplican las pruebas en favor de la idea según la cual la aparición de ARN catalítico constituyó una etapa crucial en el origen de la vida. Sigue sin conocerse cómo se formó dicho ARN

Leslie E. Orgel

Cuando la Tierra se formó, hace unos 4600 millones de años, era un lugar inhóspito y carente de vida. Mil millones de años después se hallaba cubierta por organismos parecidos a las algas cianofíceas. ¿Cómo vinieron? O mejor, ¿cómo comenzó la vida? Esta vieja pregunta sigue generando fascinantes conjeturas e ingeniosos experimentos, muchos de los cuales se centran en la posibilidad de que la aparición de ARN autorreplicante fuera un crítico punto de inflexión en el camino hacia la vida.

Hasta mediados del siglo XVII, el origen de la vida estaba resuelto. Dios había creado al hombre y a los organismos superiores, mientras que insectos, ranas y demás criaturas pequeñas surgirían por generación espontánea en el fango o en materia en descomposición. Pero a lo largo de los dos siglos posteriores tal descripción fue sometida a una revisión profunda, hasta que, mediado el XIX, dos importantes avances sentaron las bases del enfoque moderno.

En primer lugar, Louis Pasteur desarmó la noción de generación espontánea al demostrar que hasta las bacterias y otros microorganismos procedían de progenitores parecidos a ellos. Planteó, además, la cuestión sobre la entrada en existencia de la primera generación de cada especie.

El segundo avance, la teoría de la selección natural, sugería una respuesta. De acuerdo con dicha teoría, propuesta por Charles Darwin y Alfred Russel Wallace, algunas de las diferencias entre los individuos de una población eran hereditarias. Ante los cambios que se operan en el entorno, los individuos dotados de rasgos que les proporcionen una mejor adaptación al nuevo estado de cosas poseen las mejores posibilidades de reproducción. En consecuencia, la siguiente generación contiene un porcentaje mayor de individuos mejor adaptados, con características más eficaces. En otras palabras, la presión del medio selecciona en pro de la perpetuación de aquellos rasgos que implican una mejor adaptación.

La selección natural, actuante generación tras generación, podría llevar a la evolución de organismos muy complejos a partir de otros muy simples. La teoría implica, por tanto, que todas las formas de vida actuales proceden de un progenitor único y simple, al que se le denomina último antecedente común de la vida. (Se dice que es el "último", y no el "primero", porque se trata de la forma de vida común a todos los organismos actuales; ella misma debió tener antepasados más remotos.)

Darwin escribió en su último párrafo de *El origen de las especies* que el Creador inspiró vida originalmente a algunas formas o a una de ellas. Entró entonces la evolución: "A partir de un comienzo tan elemental se fueron produciendo ilimitadamente formas más bellas y maravillosas, que siguen evolucionando." En correspondencia privada, sin embargo, apuntó la posibilidad de que la vida surgiera de un proceso químico, "en una pequeña charca caliente, en presencia de todo tipo de sales de amonio y de ácido fosfórico, de luz, calor, electricidad, etc". Durante buena parte del siglo XX, las investigaciones sobre el origen de la vida se han encaminado a desentrañar la hipótesis mencionada en privado por Darwin —es decir, a elucidar de qué forma la interacción espontánea entre moléculas relativamente simples disueltas en los lagos y océanos del mundo prebiótico pudo dar lugar al último antepasado común de la vida.

Para responder a la cuestión, conviene adentrarse en las características de tal antepasado. Debía poseer información genética, esto es, instrucciones hereditarias sobre cómo operar y reproducirse; debía contar también con algún modo de replicarse y ejecutar dichas instrucciones, pues de lo contrario no habría dejado descendientes. Además, el sistema de replicación del material genético debía permitir cierta variabilidad aleatoria de los caracteres hereditarios de la copia, de forma que pudieran seleccionarse nuevos rasgos que desembocaran en la creación de especies diversas.

Partiendo de semejanzas entre organismos contemporáneos, se ha recabado información sobre el último antepasado común. Se puede asegurar que ciertos rasgos complejos presentes en todas las variedades de vida modernas también se hallaban presentes en dicho antepasado. La verdad es que resultaría punto menos que imposible que los trazos universales aludidos hubieran evolucionado por separado. Imaginémonos dos guiones de cine que, salvo algunas palabras, fueran idénticos. No sería razonable atribuirlos a dos autores distintos. Por la lógica de los hechos, un guión sería copia imperfecta del otro o, ambas versiones, transcripciones ligeramente modificadas de un tercer texto.

1. SINTESIS de cadenas de ARN (*líneas ramificadas*) sobre ADN (*línea vertical*). Hoy en día, la información genética fluye en general desde el ADN al ARN, pero muchos piensan que hubo alguna forma de ARN que evolucionó antes que el propio ADN. Esta idea constituye la base de la teoría del mundo de ARN sobre el origen de la vida; de acuerdo con la misma, el ARN hizo posible la evolución del ADN y de la vida.

LESLIE E. ORGEL es profesor de investigación en el Instituto Salk. Se doctoró en 1951 por la Universidad de Oxford. En la de Cambridge, donde pasó a enseñar muy pronto, contribuyó al desarrollo de la teoría del campo ligando, una rama de la química inorgánica. En los Estados Unidos, concentró buena parte de su investigación en la química relacionada con el origen de la vida.

Entre las semejanzas manifiestas está la constitución de los seres vivos, formados todos por parecidos compuestos orgánicos (ricos en carbono). Otra propiedad compartida: las proteínas presentes en los organismos de nuestros días se forjan a partir de un conjunto de 20 aminoácidos típicos. Entre dichas proteínas se incluyen las enzimas (catalizadores biológicos), que son esenciales para el desarrollo, la supervivencia y la reproducción.

Además, los organismos contemporáneos portan su información genética en los ácidos nucleicos, ARN y ADN; y emplean esencialmente el mismo código genético, que especifica las secuencias de aminoácidos de todas las proteínas que cada organismo necesita. Con mayor precisión, las instrucciones están en forma de secuencias específicas de nucleótidos, que son los fragmentos constitutivos de los ácidos nucleicos. Los nucleótidos constan de un azúcar (desoxirribosa en el ADN y ribosa en el ARN), un grupo fosfato y una base nitrogenada, entre cuatro distintas. En el ADN, las bases son adenina (*A*), guanina (*G*), citosina (*C*) y timina (*T*). En el ARN tenemos uracilo (*U*) en vez de timina. Las bases establecen el alfabeto; grupos de tres bases constituyen las palabras. Por ejemplo, el triplete *CUU* del ARN le indica a la célula que añada un aminoácido leucina a la cadena de proteína en gestación.

De estos datos podemos deducir que nuestro último antepasado común almacenaba información genética en ácidos nucleicos que especificaban la composición de todas las proteínas necesarias. También las proteínas se ocupaban de dirigir la mayoría de las reacciones requeridas para la propia perpetuación. Por tanto, el problema central de la investigación sobre el origen de la vida podría resumirse en la siguiente pregunta: ¿mediante qué serie de reacciones químicas se formó el sistema interdependiente de ácidos nucleicos y de proteínas?

Cualquiera que aborde este rompecabezas se encuentra de inmediato con una curiosa paradoja: la síntesis de ácidos nucleicos requiere ahora la intervención de proteínas, pero no hay síntesis de proteínas sin la presencia de la secuencia de nucleótidos correspondiente. Resulta inverosímil que las proteínas y los ácidos nucleicos, dotados unas y otros de estructuras complejas, aparecieran espontáneamente en el mismo lugar y al mismo tiempo. No es menos imposible que hubiera unas sin otros. Por tanto, en una primera aproximación, diríase que la vida nunca podría haber surgido por medios químicos.

A finales de los años sesenta, Carl R. Woese, Francis Crick y el autor sugirieron, sin previo acuerdo, un camino para superar la aporía. Propusimos que el ARN pudo ser el primero en aparecer para instaurar un mundo de ARN: un mundo en que el ARN catalizaba todas las reacciones necesarias para que un precursor del último antepasado común de la vida sobreviviera y se reprodujera. Postulamos, asimismo, que el ARN podría luego haber desarrollado la capacidad de unir aminoácidos entre sí y formar proteínas. Este escenario se habría producido, indicábamos, en el caso exclusivo de que el ARN prebiótico poseyera dos propiedades de las que hoy carece: capacidad de replicarse sin ayuda de proteínas y capacidad de catalizar cada etapa de la síntesis proteica.

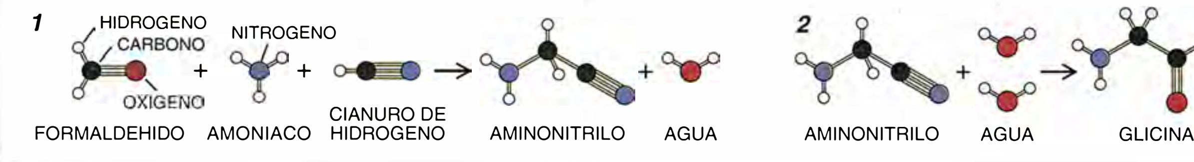
Teníamos razones para atribuir el origen del sistema genético al ARN y no al ADN, pese a que éste es ahora el principal depositario de la información hereditaria. El motivo principal residía en que los ribonucleótidos se sintetizan con mayor facilidad que los desoxirribonucleótidos del ADN. Por otro lado, no costaba imaginar vías de evolución desde el ARN hacia el ADN, que, por ser más estable, tomaría el relevo del ARN en la función de guardián de la herencia. Sospechamos que el ARN surgió antes que las proteínas, en parte porque nos era difícil admitir un escenario donde las proteínas se replicasen en ausencia de ácidos nucleicos.

A lo largo de los últimos diez años, hemos asistido a una sucesión de pruebas que apoyan la hipótesis de la existencia real de un mundo de ARN, del que arrancó la vida fundada en ADN, ARN y proteínas. En 1983, Thomas R. Cech y Sidney Altman decubrieron, cada uno por su cuenta, las primeras ribozimas, enzimas hechas de ARN. Creíase, hasta entonces, que las proteínas realizaban todas las reacciones experimentadas en los organismos contemporáneos. Y así, el término "enzima" se reservaba para las proteínas. Las primeras ribozimas conocidas podían apenas hacer algo más que cortar y unir ARN preexistente. Pero ese compor-

Experimento sobre el origen de la vida

A comienzos de los años cincuenta, Stanley L. Miller, del laboratorio de Harold C. Urey en la Universidad de Chicago, realizó el primer experimento diseñado para conocer las reacciones químicas que ocurrieron en la Tierra primitiva (*derecha*). En el matraz de la parte inferior, creó un "océano" de agua, que calentó haciendo circular vapor de agua a través del aparato. En el recipiente superior, preparó una "atmósfera" de metano (CH_4), amoníaco (NH_3), hidrógeno (H_2) y el vapor circulante, mezclados. A continuación sometió los gases a una descarga eléctrica continua ("relampagueo"), provocando su interacción. Los productos solubles en agua procedentes de dichas reacciones se recogieron sobre el simulacro de océano mediante un condensador. El experimento condujo a numerosos aminoácidos en la imitación de océano y permitió a Miller explicar cómo se habían formado. Por ejemplo, la glicina apareció tras la formación, en las reacciones atmosféricas, de compuestos sencillos —formaldehído y cianuro de hidrógeno— que participaron en el conjunto de reacciones mostradas abajo. Años después de este experimento, un meteorito que cayó cerca de Murchison, Australia, se vio que contenía varios de los mismos aminoácidos (*tabla*) que Miller había identificado —y aproximadamente en las mismas proporciones relativas (*puntos*); los aminoácidos presentes en las proteínas están resaltados en azul. Tales coincidencias reforzaron la idea de que el experimento de Miller se aproximaba a la química de la Tierra prebiótica. Sin embargo, descubrimientos más recientes han arrojado ciertas dudas sobre dicha conclusión.

ASI SE FORMO LA GLICINA



tamiento “enzimático” dio soporte a la idea de que el antiguo ARN pudiera también haber sido catalítico.

Aunque no se han descubierto todavía moléculas de ARN que dirijan la replicación de otras moléculas de ARN, las ingeniosas técnicas ideadas por Cech y Jack W. Szostak han permitido modificar ribozimas naturales para que acometan reacciones secundarias de la replicación del ARN, como acoplar entre sí cadenas de nucleótidos u oligonucleótidos (secuencias cortas de nucleótidos).

Recientemente, Szostak encontró una prueba más firme de replicación del ARN en la Tierra primitiva, operada por una molécula de ARN producida en la química prebiótica. Comenzó creando un conjunto de oligonucleótidos aleatorios, parecido al conjunto estocástico que pudo darse hace 4000 millones de años. De dicho conjunto aisló un catalizador capaz de unir nucleótidos entre sí. No menos importante, el catalizador podía obtener energía para la reacción a partir de un grupo trifosfato (tres fosfatos unidos), el mismo que hoy proporciona combustible en la mayoría de las reacciones bioquímicas de sistemas vivos, incluida la replicación de los ácidos nucleicos. Tal semejanza apoya la idea de que una molécula de ARN pudo ser el predecesor de los catalizadores proteicos que en nuestros días realizan la replicación del material genético en los organismos.

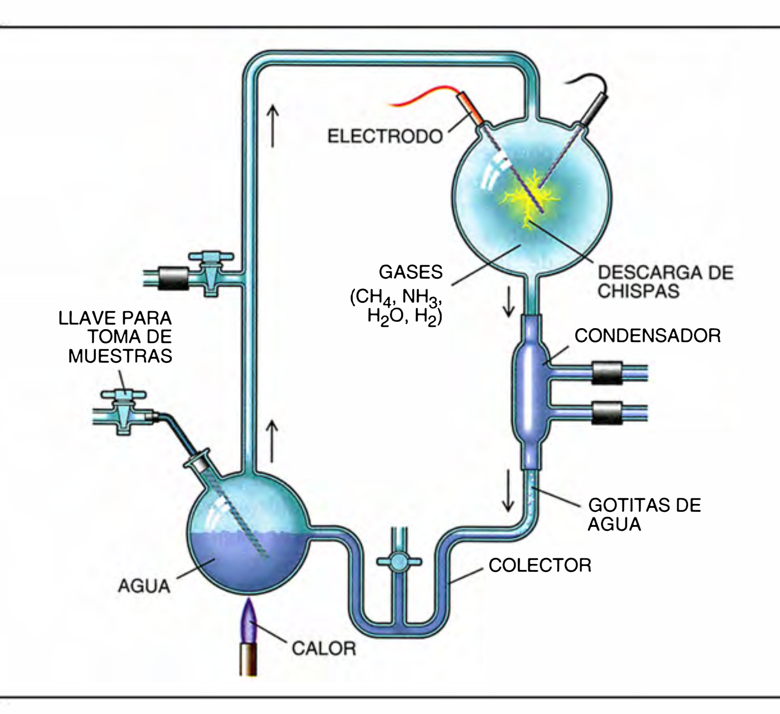
Los estudios de los ribosomas, fábricas de proteínas de las células, han aportado alguna luz sobre otro aspecto importante de la hipótesis de un mundo de ARN: la posibilidad de que el ARN hubiera creado la síntesis de proteínas. Los ribosomas, que constan de ARN ribosómico y proteína, se trasladan a lo largo de cadenas de ARN mensajero (transcripciones en cadena simple de los genes codificadores de proteínas portados por el ADN). Conforme los ribosomas avanzan, unen un aminoácido específico al siguiente, formando un enlace peptídico entre ambos. Harry F. Noller, Jr., conjetura que probablemente sea el ARN de los ribosomas, y no la proteína, el que catalice la formación de los enlaces peptídicos.

Otros trabajos indican que el mundo primitivo de ARN fue capaz de evolucionar, tal como cabría esperar de cualquier material que diera lugar a los genes del último antepasado común de la vida. Solomon Spiegelman y otros que le siguen demostraron que las moléculas de ARN pueden ser inducidas a adoptar nuevas características. Por ejemplo, si se deja replicar repetidamente ARN en presencia de una ribonucleasa (proteína que lo degrada), acaba convirtiéndose en resistente a dicha enzima. De modo análogo, Gerald F. Joyce y otros han aplicado métodos más refinados para obtener ribozimas capaces de romper enlaces químicos diversos, incluidos los peptídicos.

Existen, pues, razones poderosas para admitir la realidad de un mundo de ARN, inventor además de la síntesis proteica. Si esta conclusión es correcta, nuestra investigación sobre el origen de la vida habrá de centrarse en averiguar cómo se formó el mundo de ARN. Para lo cual importa detenerse en la química de la sopa prebiótica: la solución acuosa de moléculas orgánicas en la que se originó la vida. Contamos con la ventaja de que, incluso antes de que naciera la hipótesis del mundo de ARN, se había progresado en esa rama del saber.

Por los años treinta, Alexander I. Oparin y J. B. S. Haldane señalaron que los compuestos orgánicos requeridos para la vida no podrían haberse formado sobre la Tierra si la atmósfera de ésta hubiera sido tan rica en oxígeno (oxidante) como lo es ahora. El oxígeno, que captura átomos de hidrógeno de otros compuestos, impide las reacciones que permiten transformar moléculas orgánicas sencillas en otras más complejas. Oparin y Haldane propusieron, por tanto, que la atmósfera del joven planeta era reductora, lo mismo que la de los planetas exteriores: contenía muy poco oxígeno y abundaba en hidrógeno (H_2) y en compuestos capaces de ceder átomos de hidrógeno a otras sustancias. Entre los gases presentes, se suponía que existían metano (CH_4) y amoníaco (NH_3).

Las ideas de Oparin y Haldane inspiraron el famoso experimento de Miller y Urey, que en 1953 marcó el inicio de la era de la química prebiótica experimental. Harold C. Urey y Stanley L. Miller trataron de imaginar el tipo de reacciones que ocurrieron cuando la Tierra estaba aún rodeada por una atmósfera reductora. En un aparato cerrado, Miller reprodujo dicha “atmósfera” de metano, amoníaco, agua e hidrógeno, sobre un “océano” de agua. Sometió la mezcla a un “relampagueo” por medio de



AMINOACIDO	METEORITO DE MURCHISON	EXPERIMENTO DE DESCARGA
GLICINA	• • • •	• • • •
ALANINA	• • • •	• • • •
ACIDO α-AMINO-*N*-BUTIRICO	• • •	• • • •
ACIDO α-AMINOISOBUTIRICO	• • • •	• •
VALINA	• • •	• •
NORVALINA	• • •	• • •
ISOVALINA	• •	• •
PROLINA	• • •	•
ACIDO PIPECOLICO	•	◖
ACIDO ASPARTICO	• • •	• • •
ACIDO GLUTAMICO	• • •	• •
β-ALANINA	• •	• •
ACIDO β-AMINO-*N*-BUTIRICO	•	•
ACIDO β-AMINOISOBUTIRICO	•	•
ACIDO γ-AMINOBUTIRICO	•	• •
SARCOSINA	• •	• • •
N-ETILGLICINA	• •	• • •
N-METILALANINA	• •	• •

una descarga eléctrica continua. Transcurridos varios días, analizó el contenido del modelo de océano.

Miller observó que un diez por ciento del sistema se había transformado en cierto número de compuestos orgánicos identificables; un dos por ciento del carbono se empleó en fabricar aminoácidos como los que constituyen las proteínas. Este último descubrimiento revestía particular interés, ya que indicaba que los aminoácidos necesarios para la construcción de las proteínas —y para la propia vida— abundaron en el planeta primitivo. Por entonces, los científicos no se preocupaban aún demasiado del origen de los ácidos nucleicos, y centraban su atención en explicar la aparición de las proteínas sobre la Tierra.

El análisis del experimento permitió deducir muchas de las reacciones químicas que podrían haber ocurrido en el planeta prebiótico. En primer lugar, los gases de la "atmósfera" reaccionaron para originar compuestos orgánicos sencillos: cianuro de hidrógeno (HCN) o aldehídos (compuestos con el grupo CHO). Los aldehídos se combinaron a continuación con amoníaco y con el cianuro de hidrógeno, generando aminonitrilos, productos intermedios que interaccionaron con agua del "océano" para producir aminoácidos y amoníaco. La glicina, el aminoácido más abundante, resultaba de la combinación de formaldehído (CH_2O), amoníaco y cianuro de hidrógeno. También se formó un sorprendente número de los 20 aminoácidos típicos, en menor cuantía.

Desde entonces, otros investigadores han sometido diversas mezclas de gases simples a multitud de fuentes de energía. Y se ha visto que, bajo condiciones reductoras, los aminoácidos se forman fácilmente; bajo condiciones oxidantes, no se constituyen en absoluto o sólo en pequeñas cantidades.

Debemos a estudios similares algunas de las primeras pruebas sobre la formación parecida de los componentes de los ácidos nucleicos en la sopa prebiótica. En 1961, Juan Oró trató de determinar si los aminoácidos podían obtenerse por procesos químicos más simples que los que operaban en el experimento de Miller-Urey. Mezcló cianuro de hidrógeno con amoníaco en una solución acuosa, sin introducir ningún aldehído, y encontró que se formaban aminoácidos, sin ayuda de dicho reactivo. Se encontró con otro descubrimiento inesperado: la molécula más compleja identificada era la adenina.

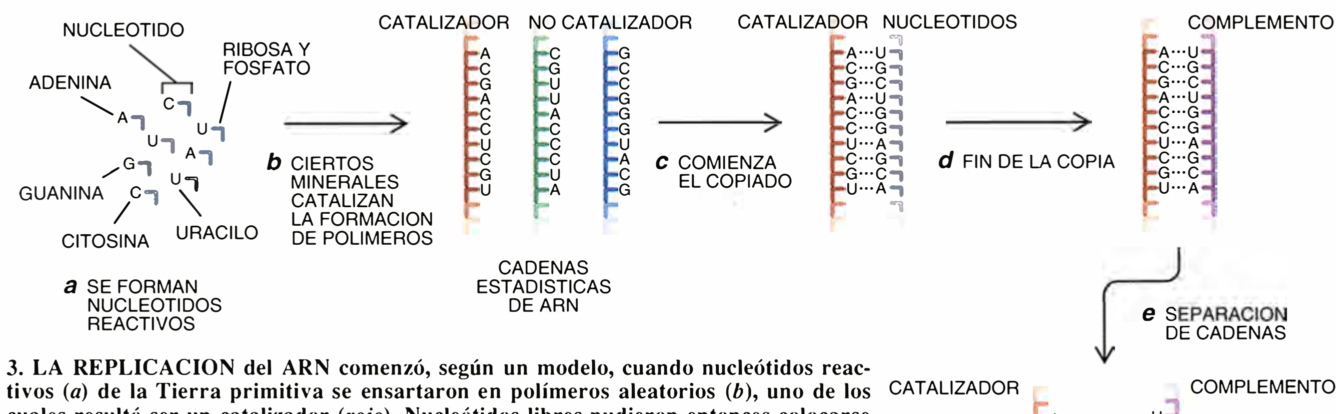
La adenina, una de las cuatro bases nitrogenadas presentes en el ARN y el ADN, es también un componente del trifosfato de adenosina (ATP), hoy la principal molécula suministradora de energía de la bioquímica. El trabajo de Oró implicaba que, si la atmósfera era reductora, la adenina —sin duda, uno de los componentes bioquímicos esenciales— habría estado disponible para contribuir a la aparición de la vida. Estudios posteriores establecieron que las restantes bases de los ácidos nucleicos podían obtenerse de reacciones entre cianuro de hidrógeno y otros dos componentes que podían haberse formado en una atmósfera prebiótica reductora: el cianógeno (C_2N_2) y el cianoacetileno (HC_3N). En definitiva, los experimentos iniciales parecían indicar que, bajo presumibles condiciones prebióticas, se pudo contar en la Tierra primitiva con elementos integrantes de las proteínas y de los ácidos nucleicos.

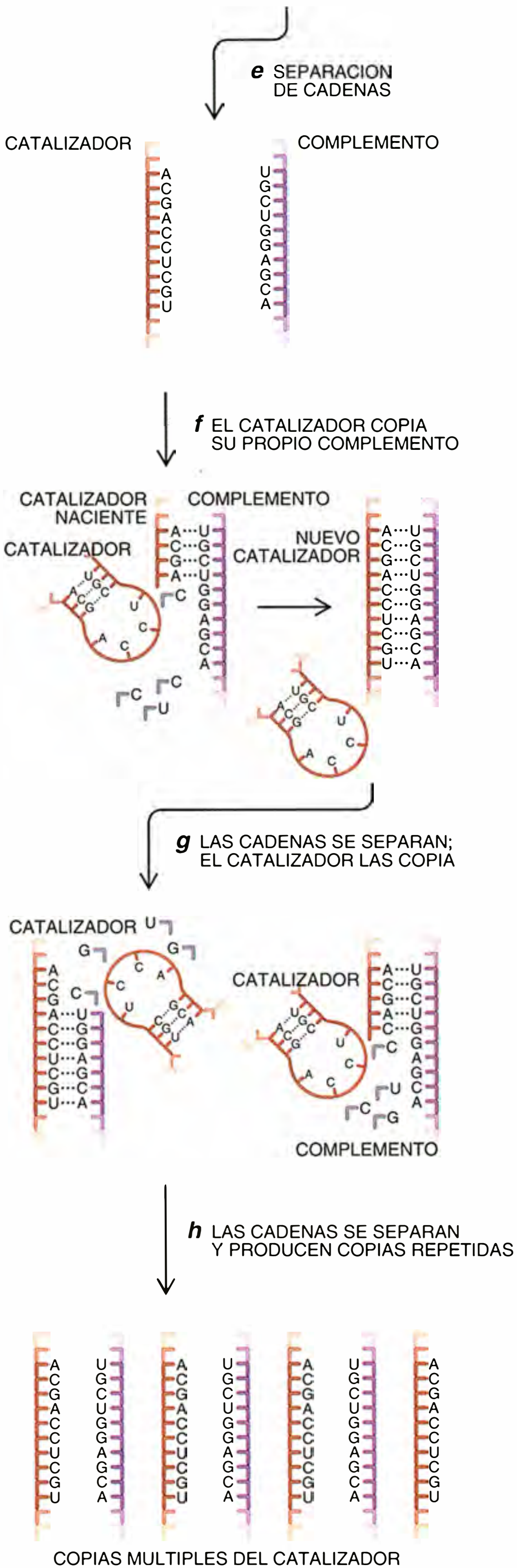
Para nuestra sorpresa, se comprobó que muchos de los compuestos generados en los diversos experimentos existen en el espacio exterior. En meteoritos carbonáceos se ha encontrado una familia de aminoácidos emparentados con los que se forman en el experimento de Miller-Urey, amén de bases púricas (adenina y guanina). Y se ha demostrado que el conjunto de pequeñas moléculas que en los experimentos de laboratorio participó en síntesis prebióticas —agua, amoníaco, formaldehído, cianuro de hidrógeno y cianoacetileno— abunda en las nubes de polvo interestelar, donde nacen las estrellas.

La coincidencia entre las moléculas presentes en el espacio exterior y las generadas en las simulaciones experimentales de química prebiótica se ha esgrimido como un espaldarazo del acierto de las pruebas de laboratorio a la hora de remedar la química de la Tierra primitiva. Pero es una argumentación menos sólida de lo que suele suponerse. De acuerdo con investigaciones recientes, la Tierra primitiva nunca fue tan reductora como Urey y Miller imaginaron. En mi opinión, muchos compuestos orgánicos generados en diversos ensayos pudieron surgir también en una atmósfera que contuviera menos hidrógeno, metano y amoníaco. Parece, pues, aconsejable dirigir la mirada hacia otros mecanismos de acumulación de constituyentes de proteínas y ácidos nucleicos en la sopa prebiótica.

Por ejemplo, las bases nitrogena-

2. EL ARN CONSTA DE NUCLEOTIDOS, cada uno de los cuales se forma con un fosfato (*recuadro verde*) y el azúcar ribosa unido a una de las cuatro bases nitrogenadas (*recuadros azules*): guanina (*G*), citosina (*C*), uracilo (*U*) o adenina (*A*). El uracilo de una cadena de ARN se une a una adenina de otra cadena, y la citosina a una guanina, produciendo una doble hélice (*izquierda*). Se cree que la unión de bases complementarias contribuyó a la replicación del ARN primitivo.





3. LA REPLICACION del ARN comenzó, según un modelo, cuando nucleótidos reactivos (*a*) de la Tierra primitiva se ensartaron en polímeros aleatorios (*b*), uno de los cuales resultó ser un catalizador (*rojo*). Nucleótidos libres pudieron entonces colocarse alineados sobre el catalizador (*c*) —así como sobre otros polímeros, no mostrados— y unirse entre sí (*d*) para formar una cadena complementaria (*violeta*). Tras la separación del catalizador y su cadena complementaria (*e*), el catalizador procede a "copiar" (hacer un complemento de) su cadena complementaria (*a la izquierda en f*). Se produce una copia de sí mismo (*cadena roja a la derecha en f*). El copiado catalítico del catalizador (*a la izquierda en g*) y de su complemento (*a la derecha en g*) asegura la perpetua replicación (*h*) de ambas cadenas. De acuerdo con este modelo, se han conseguido síntesis de cadenas complementarias sobre moldes de cortos polímeros (*c y d*), pero nadie ha conseguido todavía reproducir un polímero original sin ayuda de proteínas.

das y los aminoácidos necesarios para la vida podrían haberlos suministrado el polvo interestelar, los meteoritos o los cometas. Durante los primeros quinientos millones de años de la historia de la Tierra, el bombardeo de meteoritos y cometas debió de ser muy intenso, si bien la cantidad de material orgánico que pudo sobrevivir al impacto suscita algunas dudas. Aunque menos probable, algunos de los materiales orgánicos requeridos por la vida quizá no procedan de la superficie terrestre, sino de humeros submarinos, fisuras de la corteza por donde fluyen gases muy calientes.

Cualquiera que fuera el proceso por el que se formaron los constituyentes de los ácidos nucleicos, los partidarios de la hipótesis de un mundo de ARN deberíamos explicar cómo se generó ARN autorreplicante a partir de dichos elementos fundamentales. A tenor de la explicación más sencilla, los nucleótidos del ARN saldrían de reacciones químicas directas que condujeron a la unión del azúcar ribosa con bases de ácidos nucleicos y con fosfato (que sería asequible como material inorgánico). A continuación, los ribonucleótidos se engarzarían espontáneamente en polímeros, de los cuales uno al menos habría logrado organizar su propia reproducción.

Este modelo, aunque atractivo, resulta muy difícil de confirmar. En primer lugar, en ausencia de enzimas, cuesta sintetizar ribosa en cantidad y pureza adecuadas. Se sabe desde hace mucho tiempo que la ribosa se forma fácilmente a través de una serie de reacciones entre moléculas de formaldehído. Ahora bien, cuando se producen dichas reacciones, se crea una mezcla de azúcares en la que la ribosa es siempre un componente minoritario. La escasez relativa de ribosa no estimula el desarrollo de un mundo de ARN, porque los demás azúcares, combinados con bases nucleicas, forman productos que inhiben la síntesis y replicación de ARN. No se ha descubierto todavía una cadena sencilla y completa de reacciones que dé ribosa como producto final principal.

Más aún, los intentos de sintetizar nucleótidos directamente a partir de sus componentes bajo condiciones prebióticas han alcanzado resultados modestos. Una serie esperanzadora de experimentos rendía nucleósidos de purina —es decir, unidades compuestas de ribosa y una base púrica, pero sin el grupo fosfato presente en el nucleótido completo. Pero han fracasado los esfuerzos por obtener eficazmente nucleósidos pirimidínicos (combinaciones de ribosa con citosina o uracilo), sin ayuda de enzimas.

Mediante sencillas reacciones prebióticas se han conseguido nucleótidos combinando fosfato con nucleósidos; en la naturaleza, sin embargo, los nucleótidos surgieron acompañados de moléculas emparentadas que poseían estructura incorrecta. Si tales mezclas se hubieran producido en el joven planeta, los nucleótidos incorrectos habrían interaccionado con los normales impidiendo la catálisis y la replicación del ARN. Por tanto, si bien podemos remedar cada etapa de la síntesis de ribonucleótidos, no acabamos de entender de qué modo las reacciones operadas en tiempos prebióticos desembocaron en el desa-

rrollo de los ribonucleótidos necesarios para establecer la autorreplicación del ARN.

A este propósito, se ha aducido la intervención de catalizadores inorgánicos que asegurasen la formación exclusiva de nucleótidos correctos. En tal sentido, si se adsorbieran los componentes de los nucleótidos sobre la superficie de determinados minerales, se combinarían únicamente en determinada orientación. La posibilidad de que algunos minerales sirvieran de catalizadores es real. No obstante, ninguno de los ensayos realizados ha mostrado la especificidad requerida para producir sólo los nucleótidos correctos.

Cabe también que hubiera reacciones no enzimáticas que condujeran a la síntesis eficaz de ribonucleótidos puros. Nadie ha conseguido identificarlas. Albert Eschenmoser ha logrado limitar el número de azúcares generados al preparar ribosa por polimerización de moléculas de formaldehído; en sus ensayos, reemplazó uno de los intermedios normales de la reacción por otro parecido, pero fosforilado, y dejó transcurrir las etapas subsiguientes. Bajo determinadas condiciones, el principal producto fue un derivado fosforilado de la ribosa. Para que fuera la ribosa fosforilada característica de los nucleótidos, los grupos fosfato deberían transponerse a otras posiciones; mas, a pesar de ello, los resultados avalan la posibilidad de que hubiera reacciones prebióticas desconocidas que desembocaran en una síntesis de ribonucleótidos.

Supongamos que los defensores de la hipótesis del mundo de ARN demostraran que los ribonucleótidos aparecieron por vía no enzimática. Les quedaría aún por explicar que los nucleótidos podían polimerizarse y los polímeros replicarse sin ayuda de proteínas. Un reto al que están consagrados hoy químicos y biólogos moleculares. Cabe, aquí también, el que sustancias minerales hubieran ensartado nucleótidos reactivos para formar polímeros. James P. Ferris ha demostrado que la montmorillonita, una arcilla común, cataliza la síntesis de oligonucleótidos de ARN.

No es fácil imaginarse las etapas por las que atravesó el ARN hasta replicarse en ausencia de proteínas. Los trabajos realizados en mi laboratorio parecían abonar la posibilidad de dicha replicación. Sintetizamos oligonucleótidos y los mezclamos con nucleótidos libres. Estos se alinearon frente a los oligonucleótidos y se combinaron entre sí dando lugar a nuevos oligonucleótidos.

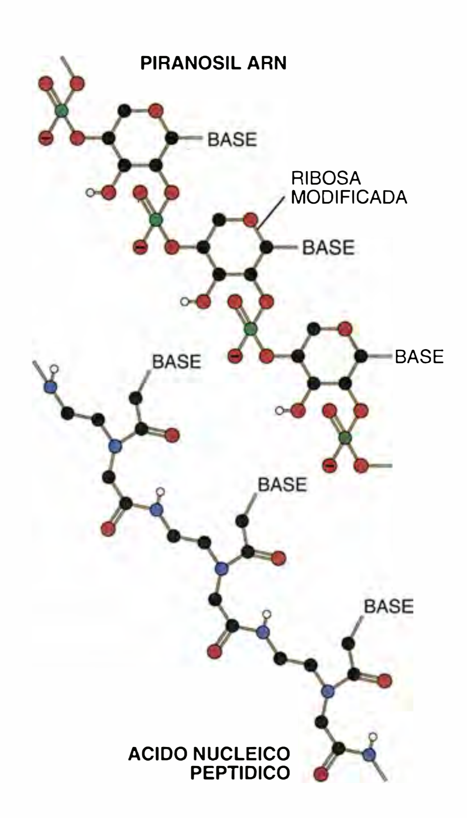
Para ser más preciso, los nucleótidos libres no se combinaron aleatoriamente frente a los oligonucleótidos originales. Desde 1953, cuando James D. Watson y Francis Crick resolvieron la estructura tridimensional del ADN, se sabía que la adenina de los nucleótidos se empareja con la timina en el ADN y con el uracilo en el ARN; de manera similar, la guanina se empareja con la citosina. Estas unidades acopladas se conocen como pares de bases Watson-Crick. Los oligonucleótidos que surgieron de nuestros experimentos se formaron mediante pares de bases Watson-Crick, siendo por tanto complementarios de las cadenas originales. Así, un molde constituido por una cadena de nucleótidos que contuvieran sólo citosina dirigía la construcción de un polímero complementario integrado por ribonucleótidos de guanina.

La formación de tales complementos a partir de un molde original —un proceso al que denominaré "copia"— podría ser la primera etapa en la replicación prebiótica de una cadena determinada de ARN. A continuación, las cadenas deberían separarse, y debería construirse un complemento del complemento (una réplica de la cadena original). Los experimentos descritos establecieron sin ambigüedad que la atracción mutua entre adenina y uracilo (y entre guanina y citosina) bastaba, por sí sola, para generar cadenas complementarias de numerosas secuencias de nucleótidos. Las enzimas tornan más eficaz el proceso y permiten copiar un mayor espectro de cadenas de ARN.

Tras años de pruebas, sin embargo, no hemos conseguido la segunda etapa de la replicación —la copia de una cadena complementaria para crear un duplicado de la plantilla inicial— sin ayuda de enzimas proteicas. También resultó decepcionante el que sólo logramos inducir el copiado del molde original si operábamos con nucleótidos de configuración dextrógira. Hoy, todos los nucleótidos sintetizados biológicamente son dextrógiros, pero en la Tierra primitiva existía un número igual de nucleótidos dextrógiros y levógiros. Cuando pusimos en nuestras mezclas de reacción un número igual de ambos tipos de nucleótidos, se bloqueó el proceso de copia.

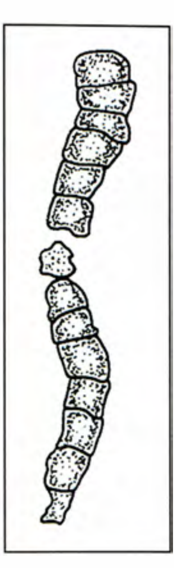
Se trata de problemas que, si bien preocupantes, no descartan en absoluto la posibilidad de una síntesis y replicación iniciales del ARN a través de procesos bastante sencillos. Tal vez, la síntesis de nucleótidos de estructura adecuada y su polimerización en un conjunto aleatorio de oligonucleótidos se catalizaron por minerales. Nacería, a continuación, una pareja de cadenas complementarias producida por un proceso de copiado sin replicación. Si sucediera, como sugiere Szostak, que una de las cadenas fuera una ribozima que copiara a su complemento y de ese modo se duplicara a sí misma, se cumplirían las condiciones requeridas para una replicación exponencial de las dos cadenas. Un modelo muy atractivo, sin duda; podría también ser correcto.

Ante las dificultades que entrañan la síntesis de nucleótidos y la replicación del ARN bajo condiciones prebióticas razonables, niegan muchos que esa molécula fuera la primera que se autorreplicó en la Tierra primitiva. Proponen otro sistema más sencillo y anterior. En este enfoque, el ARN sería el monstruo de Frankenstein que terminó por desplazar a su inventor. Fue A. Graham Cairns-Smith quien lanzó la idea de esta usurpación genética. Sostiene, y otros con él, que



4. DOS MOLECULAS emparentadas con el ARN, construidas recientemente (los átomos de hidrógeno sobre los carbonos no están representados). El piranosil-ARN (*arriba*) difiere del ARN en que la ribosa contiene un anillo de seis eslabones, en vez de los cinco característicos. Un ácido nucleico peptídico (*abajo*) contiene bases de ácidos nucleicos y un esqueleto de tipo proteico. Algunas pruebas sugieren que, en tiempos prebióticos, hubo polímeros con similares características que se replicarían con mayor facilidad que el ARN; el ARN podría haber evolucionado a partir de una molécula así.





5. ESTROMATOLITOS MODERNOS (*fotografía de la izquierda*), **estructuras construidas por cianobacterias en Shark Bay, Australia. En otro lugar de Australia, J. William Schopf encontró restos de estromatolitos de 3600 millones de años de antigüedad, junto a fósiles de células de hace 3500 millones de años** (*fotografía de la derecha*), **que se parecen a cianobacterias modernas; los fósiles semejan cadenas de células** (*diagrama*). **Los descubrimientos de Schopf indican que, independientemente de cómo se iniciara la vida, ésta se hallaba ya bien establecida mil millones de años después de la formación de la Tierra.**

los componentes del primer sistema genético eran o bien muy elementales o bien podían al menos generarse de forma sencilla. A Cairns-Smith le debemos también una de las tesis más radicales sobre la naturaleza de ese sistema genético inicial.

Hace unos 30 años propuso que el primer sistema replicante fue inorgánico. En su opinión, ciertas irregularidades de la estructura de una arcilla —una distribución irregular de cationes (iones cargados positivamente), por ejemplo— eran las depositarias de la información genética. La replicación podría haberse realizado si una disposición determinada de los cationes en una capa de la arcilla dirigiera la síntesis de una nueva capa con una distribución de cationes casi idéntica. Se habría producido un proceso de selección en el caso de que la distribución de cationes de una capa determinara la eficacia del proceso de copiado de la misma. Hasta ahora, nadie ha corroborado en el laboratorio tan atrevida hipótesis. Tampoco parece plausible en teoría, puesto que las irregularidades en la arcilla que alcanzaran complejidad suficiente para forzar la aparición de ARN no poseerían probablemente la capacidad necesaria para producir una autorreplicación muy precisa.

Otros investigadores han optado por buscar materiales genéticos alternativos. En un fascinante ejemplo, Eschenmoser ha creado una molécula de piranosil-ARN (pARN), muy parecida al ARN aunque con una versión de ribosa diferente. En el ARN natural, la ribosa contiene un anillo de cinco eslabones con cuatro carbonos y un oxígeno; la ribosa de la estructura de Eschenmoser ha sido alterada para que aloje un carbono adicional en el anillo de azúcar.

Eschenmoser ha observado que las cadenas complementarias del piranosil-ARN pueden combinarse mediante pares de bases de Watson-Crick y dan lugar a unidades de doble cadena que permiten un número menor de variaciones no deseadas de las que son posibles en el ARN normal. Además, las cadenas no se arrollan entre sí. En un mundo sin enzimas proteicas, el arrollamiento impediría que las cadenas se separaran nítidamente al prepararse para la replicación. Bajo numerosos puntos de vista, por tanto, el piranosil-ARN parecería más adecuado para la replicación que el propio ARN. Si se desarrollaran métodos simples para sintetizar ribonucleótidos con un azúcar de seis eslabones, podría erigirse esa variedad de ARN en potencial antecesor de la forma más familiar de la molécula.

Desde una perspectiva distinta, Peter E. Nielsen ha empleado modelos asistidos por ordenador para diseñar un polímero que combina un esqueleto proteico con cadenas laterales de bases nucleicas. Al igual que en el ARN, una cadena de este polímero, o ácido nucleico peptídico (ANP), puede combinarse establemente con una cadena complementaria; el resultado implica que, como en el clásico ARN, un ARN peptídico puede servir de plantilla para la construcción de su complemento. Numerosos polímeros con esqueletos emparentados pueden comportarse del mismo modo; tal vez uno de ellos participó en un sistema genético primitivo.

Piranosil-ARN y ácidos nucleicos peptídicos hallan, en los pares de bases de Watson-Crick, el elemento estructural que posibilita un emparejamiento complementario. Pero quienes se afanan en descubrir sistemas genéticos más simples ensayan también la síntesis de moléculas complementarias que no dependan de las bases de nucleótidos para el copiado sobre una plantilla. No hay, sin embargo, pruebas de que los polímeros formados por tales unidades puedan replicarse.

Surgiera el ARN por vía espontánea o reemplazara a otro material genético anterior, su aparición constituyó un momento diacrítico en el desarrollo de la vida. Muy probablemente el ARN condujo a la síntesis de las proteínas, a la formación del ADN y a la aparición de una célula que se convirtió en el último antepasado común de la vida.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

GENETIC TAKEOVER AND THE MINERAL ORIGINS OF LIFE. A. Graham Cairns-Smith. Cambridge University Press, 1982.

EVOLUCIÓN MOLECULAR DIRIGIDA. Gerald F. Joyce en *Investigación y Ciencia*, n.º 197, páginas 22-29, febrero de 1993.

THE OLDEST FOSSILS AND WHAT THEY MEAN. J. W. Schopf en *Major Events in the History of Life*. Dirigido por J. W. Schopf. Jones & Bartlett, 1992.

THE RNA WORLD. Dirigido por Raymond F. Gesteland y John F. Atkins. Cold Spring Harbor Laboratory Press, 1993.



La evolución de la vida en la Tierra

La historia de la vida no indica necesariamente progreso. Ni es predecible. Los organismos han evolucionado a través de una serie de episodios contingentes y fortuitos

Stephen Jay Gould

La selección natural es una teoría tan poderosa cuan simple, que ha resistido el análisis implacable y la comprobación tenaz a que se ha visto sometida durante los 135 años transcurridos desde su formulación. En esencia, sitúa el mecanismo del cambio evolutivo en una "lucha" entre los organismos por el éxito reproductivo, lo que conduce a una mejor adaptación de las poblaciones a un entorno que se transforma. (Entre las tácticas para el éxito reproductor se incluyen el apareamiento temprano y más frecuente o una mejor cooperación de los progenitores en la crianza.) La selección natural, por tanto, es un principio de adaptación local, no de progreso general.

Pero la selección natural no es la única causa del cambio evolutivo; en numerosas ocasiones puede quedar ensombrecida por otras fuerzas. Una aplicación taimada de la teoría evolutiva da por sentado que puede encontrarse una explicación biológica sobre el valor adaptativo de cualquier carácter en su ambiente original. El propio Darwin insistió en la naturaleza multifactorial del cambio evolutivo y alertó frente a una confianza exclusiva en la selección natural. "Estoy convencido, decía, de que la selección natural ha sido el medio de modificación más importante, aunque no el único."

La selección natural no basta para explicar el cambio evolutivo. Por dos razones principales. Primera, existen otras muchas causas poderosas, sobre todo en el dominio de la organización biológica, más acá y más allá del tradicional enfoque darwiniano centrado en los organismos y en sus luchas por el éxito reproductivo. En el nivel más bajo de sustitución de pares de bases de ADN, el cambio suele ser neutro, y por ende aleatorio. En niveles superiores, de especies o faunas enteras, el equilibrio puntuado o intermitente produce tendencias evolutivas mediante la selección de especies de acuerdo con su tasa de formación y extinción; al tiempo que las extinciones en masa barren partes sustanciales de las biotas por motivos que no guardan relación con las luchas adaptativas en las épocas "normales" interpuestas entre dos de esos episodios aniquiladores.

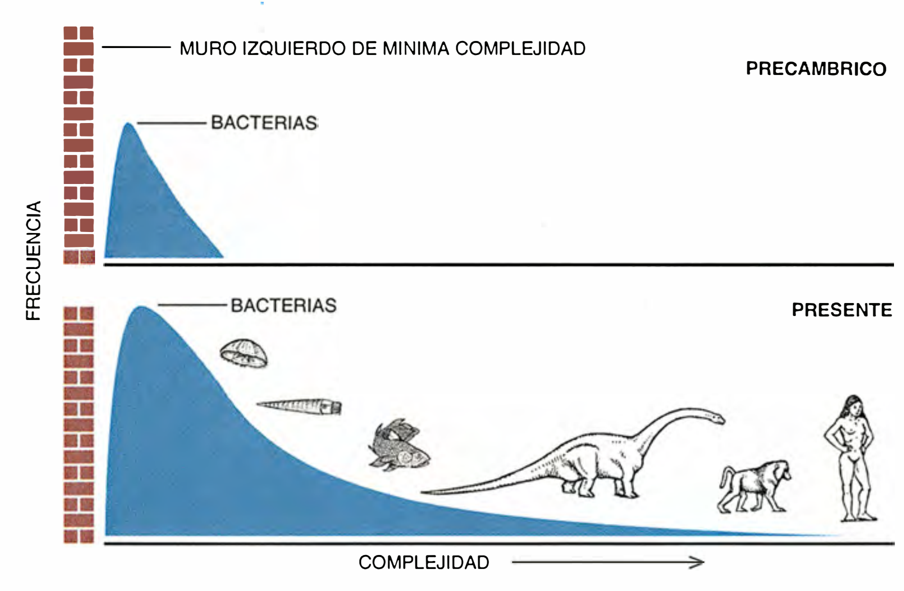
Vayamos con la segunda razón principal, núcleo de este artículo. Por adecuada que sea nuestra teoría general del cambio evolutivo, seguimos esperando poder documentar y comprender la senda real recorrida por la historia de la vida. Sin duda, la teoría sirve para explicar ese camino y puede incluso predecir aspectos generales del modelo geológico de la vida. Pero la senda real en cuanto tal *no está en absoluto determinada* por nuestra teoría general de la evolución. Este punto fundamental de la complejidad del mundo no suele entenderse bien. Porque las redes y las cadenas de acontecimientos históricos son intrincadas, se hallan impregnadas de elementos aleatorios y caóticos y se muestran irrepetibles (abarcan multitud de objetos únicos que interactúan de forma exclusiva) es por lo que los modelos clásicos de predicción y replicación no pueden aplicarse aquí.

La historia es de hechos acontecidos y su interpretación adquiere sentido si las pruebas son pertinentes. Pero no puede predecirse de antemano. Pierre-Simon Laplace, reflejando el determinismo del siglo XVIII, afirmaba que podría especificar todos los estados futuros si conociera la posición y el movimiento de todas las partículas del cosmos en un momento dado; pero la naturaleza de la complejidad universal hace añicos esa quimera. La historia incluye demasiado caos, o una dependencia extremadamente sensible de diferencias minúsculas e inconmensurables en las condiciones iniciales, lo que conduce a resultados divergentes sobre la base de disparidades mínimas en el origen. Y la historia comprende también excesiva contingencia: los resultados actuales se deben a largas cadenas de estados antecedentes impredecibles y no a la determinación inmediata por leyes eternas de la naturaleza.

El hombre no apareció en la Tierra porque la teoría evolutiva prediga su presencia fundándose en axiomas de progreso y complejidad neural creciente. Los seres humanos surgieron, por contra, en virtud de un resultado fortuito y contingente de miles de acontecimientos trabados, cada uno de los cuales pudo haber tenido lugar de manera diferente y haber dirigido la historia hacia una senda alternativa que no hubiera conducido a la conciencia. Por citar algunos de entre una multitud: 1) Si nuestro linaje irrelevante y frágil no se hubiera contado entre los supervivientes de la radiación inicial de vida

1. PLACA CON EJEMPLARES de *Pteridinium*, de Namibia; se trata de un organismo prominente de la fauna de Ediacara, que apareció hace unos 600 millones de años. Los animales ediacarenses se extinguieron antes de la explosión de la vida moderna en el Cámbrico. Estos organismos tenues, acolchados y laminares podrían ser los antepasados de formas modernas, pero también representar un experimento distinto, fracasado, de la vida pluricelular.

STEPHEN JAY GOULD enseña biología, geología e historia de la ciencia en la Universidad de Harvard, a cuyo claustro pertenece desde 1967.



2. EL PROGRESO NO GOBIERNA el proceso evolutivo. Ni siquiera constituye una fuerza propulsora importante del mismo. La vida surge cerca de la "pared izquierda" de su complejidad, la más sencilla de cuantas cabe concebir y pueden conservarse. Este estilo de vida, el bacteriano, ha perdurado, es muy común y ha tenido mucho éxito. Con el tiempo, algunos organismos se desplazan hacia la derecha y extienden así la cola correspondiente de la distribución de complejidad. Muchos se mueven siempre hacia la izquierda, pero son absorbidos dentro del espacio ya ocupado. El modo de vida bacteriano no ha cambiado nunca de posición; sólo ha crecido.

pluricelular animal en la explosión del Cámbrico, hace 530 millones de años, entonces no habría habido ningún vertebrado. (Sólo se ha encontrado un miembro de nuestro tipo o *phylum*, el de los cordados, entre estos primeros fósiles: *Pikaia*. Este animal nadador, pequeño y simple, que evidencia en su notocordio su relación de parentesco con nosotros, es uno de los fósiles más raros de la fauna cámbrica de Burgess Shale.) 2) Si un grupo de peces de aletas lobuladas no hubiera desarrollado por evolución huesos de las aletas con un fuerte eje central capaz de aguantar peso en tierra, entonces quizá los vertebrados nunca hubieran colonizado la tierra firme. 3) Si un gran cuerpo extraterrestre no hubiera hecho impacto en el planeta hace 65 millones de años, entonces los dinosaurios tal vez seguirían siendo dominantes y los mamíferos insignificantes (situación registrada a lo largo de los 100 millones de años anteriores al suceso). 4) Si una pequeña estirpe de primates no hubiera alcanzado por evolución la postura erecta en las sabanas africanas, hace de dos a cuatro millones de años, entonces nuestra ascendencia podría haber terminado en un linaje de simios que, como el chimpancé y el gorila, se habrían convertido en especies marginales desde el punto de vista ecológico, condenadas probablemente a la extinción pese a la complejidad de su conducta.

Para entender, pues, los episodios y generalidades de la senda de la vida debemos acudir, más allá de los principios de la teoría evolutiva, al examen paleontológico del modelo contingente de la historia real: la única versión que cristalizó entre los millones de alternativas plausibles. Semejante visión de la historia de la vida se aleja de los modelos deterministas habituales en ciencia y se aparta también de las ideas arraigadas en la cultura occidental, donde el hombre constituye la expresión más sublime de la vida y se erige en administrador planetario por antonomasia.

La senda de la vida incluye, sin duda, muchas características predecibles a partir de las leyes de la naturaleza, pero estos aspectos son demasiado generales para proporcionar la "exactitud" que buscamos a la hora de validar los resultados de la evolución: rosas, setas, personas, etcétera. Los organismos se adaptan a los principios físicos, y se hallan constreñidos por ellos. En este sentido, no ha de sorprendernos, dadas las leyes de la gravedad, que los mayores vertebrados en el mar (las ballenas) superen a los más pesados animales en tierra (los elefantes en la actualidad, los dinosaurios en el pasado), que, a su vez, son mucho más corpulentos que los mayores vertebrados que jamás hayan volado (los pterosaurios del Mesozoico).

Existen reglas ecológicas predecibles que rigen la estructuración de las comunidades mediante principios de flujo de energía y de termodinámica (más biomasa en las presas que en los depredadores, por ejemplo). Las tendencias evolutivas, una vez se han iniciado, pueden tener una predecibilidad local; por ejemplo, "carreras de armamentos" en las que los depredadores y las presas pulen sus defensas y armas (una pauta que Geerat J. Vermeij ha denominado "escalada" y ha ejemplificado en la robustez, creciente con el tiempo, de las quelas de cangrejos y de las conchas de los gasterópodos que eran sus presas). Pero las leyes de la naturaleza no nos dicen en absoluto por qué hay cangrejos y caracoles, por qué los insectos predominan en el mundo pluricelular y por qué las formas de vida más complejas de la Tierra son los vertebrados.

Contra la opinión según la cual la historia de la vida es un proceso predecible y de complejidad gradualmente creciente a través del tiempo, existen tres rasgos prominentes del registro paleontológico, en torno a los cuales vertebraremos el resto del artículo. Se trata de los siguientes: la constancia de la complejidad modal a lo largo de la historia de la vida; la concentración de los hitos principales en breves explosiones separadas por prolongados intervalos de relativa estabilidad, y el papel de las condiciones externas (por encima de todas, las extinciones en masa) a la hora de arruinar las pautas de las épocas "normales". Estas tres características, combinadas con temas más generales de caos y contingencia, requieren un nuevo marco para conceptualizar la historia de la vida, razón por la cual este artículo se cierra con sugerencias para una nueva iconografía de la evolución.

La Tierra tiene 4600 millones de años de edad y las rocas más antiguas datan de hace unos 3900 millones de años; la superficie de la Tierra se fundió en una fase muy temprana de su historia, como resultado del bombardeo por grandes fragmentos de residuos cósmicos, durante la coalescencia del sistema solar, y del calor generado por desintegración radiactiva de isótopos de vida corta. Estas rocas antiquísimas, harto metamorfoseadas por el calor y la presión subsiguientes, no conservan fósiles (aunque algunos ven, en las proporciones de isótopos de carbono de las mismas, señales de producción orgánica). Las rocas cuya alteración no les impide conservar fósiles celulares (sedimentos africanos y australianos de 3500 millones de años de antigüedad) sí preservan células procariotas

(bacterias y cianófitos) y estromatolitos (tapices de sedimento atrapado y compactado por estas células en aguas marinas someras). Así, la vida evolucionó rápidamente en el planeta y remonta su origen a la primera oportunidad presentada. Este hecho, por sí solo, parece indicar una inevitabilidad, o al menos una predecibilidad, del nacimiento de la vida a partir de los constituyentes químicos de la atmósfera y el océano.

Tras este inicio procariota surgieron organismos más complejos. Primero, las células eucariotas, hace unos dos mil millones de años; luego, animales pluricelulares hace unos 600 millones de años, con el tránsito de la mayor complejidad desde los invertebrados hasta los vertebrados marinos y, por último (si nos atenemos al criterio de la arquitectura neural), reptiles, mamíferos y humanos. Esta es la secuencia que nos ofrecen los manuales antañones con las denominaciones de "edad de los invertebrados", "edad de los peces", "edad de los reptiles", "edad de los mamíferos" y "edad del hombre".

Aunque no niego los hechos del párrafo anterior, entiendo que nuestra inclinación por una historia ascendente con los humanos en el ápice ha distorsionado la interpretación de la senda de la vida al colocar erróneamente en el centro un fenómeno menor, que surge sólo como secuela lateral de un punto de partida físicamente limitado. La característica más notable de la vida ha sido la estabilidad de su modo bacteriano desde el inicio del registro fósil hasta nuestros días; rasgo que, además, perdurará mientras la Tierra aguante. Estamos en la "edad de las bacterias". Lo fue en el principio y lo será por siempre.

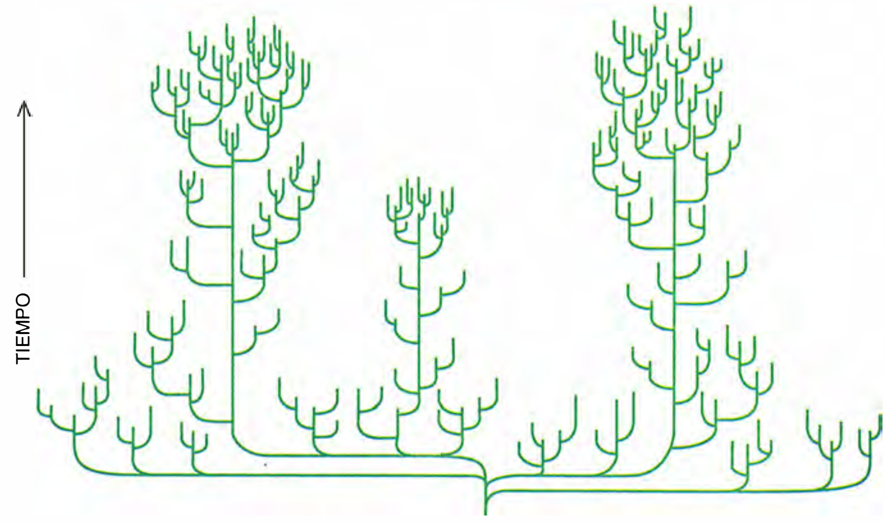
Por razones relacionadas con la química del origen de la vida y con la física de la autoorganización, los primeros seres surgieron en el límite inferior de la complejidad retenible e imaginable de la vida. Llamémosle el "muro izquierdo" de una arquitectura de la complejidad. Dado el mínimo espacio existente en el registro fósil entre esta pared y el modo bacteriano inicial, sólo cabe una dirección para el incremento futuro: hacia la derecha, hacia una mayor complejidad. De vez en cuando, surge por evolución un organismo más complejo y extiende el rango de la diversidad en la única dirección disponible. En términos técnicos, la distribución de la complejidad se hace más sesgada a la derecha a lo largo de estas adiciones ocasionales.

Pero las adiciones son raras y episódicas. Ni siquiera constituyen una serie evolutiva. Forman una secuencia abigarrada de taxones lejanamente emparentados; de acuerdo con la representación al uso: una célula eucariota, una medusa, un trilobite, un nautiloideo, un euriptérido (pariente de la cacerola de las Molucas), un pez, un anfibio como *Eryops*, un dinosaurio, un mamífero y un ser humano. No hemos de ver en esa secuencia el hilo conductor de la historia de la vida. Más que en una tendencia, piénsese en un organismo ocasional que salta a la región derecha vacía del espacio de complejidad. Durante todo ese tiempo, el modo bacteriano ha crecido en altura y se ha mantenido en su posición constante. Las bacterias son los triunfadores en el relato de la vida. Ocupan una gama de ambientes más amplia y se extienden en un rango de constituciones bioquímicas más vasto que el de ningún otro grupo. Son adaptables, indestructibles y variadísimas.

Podría aceptarse que la adquisición de complejidad creciente en el dominio de la vida representa, en su globalidad, una pseudotendencia basada en la constricción de la pared izquierda y aun así mantener que la evolución en el seno de ciertos grupos favorece, de forma discriminada, la complejidad cuando el linaje fundador empiece suficientemente lejos del muro izquierdo y permita el movimiento en ambos sentidos. Las pruebas empíricas de esta interesante hipótesis están sólo empezando a cosecharse; carecemos todavía de apoyo paleontológico para formular generalizaciones. Con todo, los dos primeros estudios (realizados por Daniel W. McShea sobre vértebras de mamíferos y por George F. Boyajian sobre líneas de sutura en ammonites) no demuestran tendencias evolutivas que favorezcan un aumento de complejidad.

Además, cuando consideramos que, por cada modo de vida que implica una mayor complejidad, existe probablemente otro tipo de similar ventaja basado en una mayor simplicidad de forma (suele darse en parásitos, por ejemplo), entonces la evolución preferente hacia la complejidad parece *a priori* improbable. Nuestra impresión de que la vida evoluciona hacia una mayor complejidad obedece, verosímilmente, a un sesgo inspirado por un enfoque localista (nuestra propia especie), lo mismo que la excesiva atención consiguiente a organismos complejos, mientras dejamos de lado otras estirpes que se adaptan igual al adquirir una forma más sencilla. El parásito que ha experimentado una degeneración morfológica, y se halla a salvo en el interior de su patrón, goza de la misma posibilidad de éxito evolutivo que su pariente redomadamente complejo que ha de habérselas con las hondas y los arcos de la azarosa fortuna en un hostil mundo exterior.

Aun cuando la complejidad fuera mero distanciamiento de una pared



3. NUEVA REPRESENTACION DEL ARBOL DE LA VIDA, donde se muestra que la máxima diversidad en las formas anatómicas (no en el número de especies) se alcanzó en un momento muy temprano de la historia pluricelular de la vida. Los tiempos posteriores dan fe de la extinción de la mayoría de estos experimentos iniciales y de un éxito espectacular en el rango de las estirpes supervivientes. Este éxito se mide por la proliferación de especies, pero no por el desarrollo de nuevas anatomías. Hay más especies hoy que nunca hubo, aunque se hallan restringidas a un número menor de anatomías básicas.



izquierda limitante, podríamos inferir que las tendencias en esa dirección serían más predecibles y características de la senda de la vida si los incrementos de complejidad se sumaran, en el curso del tiempo, de una forma persistente y gradualmente acumulativa. Pero no hay tal. El registro fósil nos pone de manifiesto la existencia de largos retazos de estabilidad rotos por espasmos episódicos.

La vida permaneció casi exclusivamente unicelular durante las primeras cinco sextas partes de su historia, desde los primeros fósiles, de hace 3500 millones de años, hasta los primeros animales pluricelulares, de hace menos de 600 millones de años. (Algunas algas pluricelulares se desarrollaron hace más de 1000 millones de años, pero pertenecen al reino vegetal, sin vinculación genealógica con los animales.) Este dilatado período de vida unicelular incluye la transición desde las células procariotas simples, sin orgánulos, hacia las células eucariotas, con núcleo, mitocondrias y otras estructuras de la arquitectura intracelular; durante 3000 millones de años no aparece, sin embargo, ningún destello de organización animal pluricelular. Si tan buena es la complejidad, y la pluricelularidad representa su fase inicial en nuestra concepción habitual, habrá que convenir en que la vida se lo pensó mucho antes de dar ese paso. Demora que cuestiona la idea de progreso general como motivo principal de la historia de la vida, aun cuando ese retardo pueda justificarse por la ausencia de suficiente oxígeno atmosférico durante la mayor parte del Precámbrico o por el fracaso de la vida unicelular en conseguir algún umbral estructural que actuara de prerrequisito para la pluricelularidad.

Y lo más curioso: los estadios principales de la organización de la arquitectura animal ocurrieron en un corto período, entre hace menos de 600 millones de años y hace unos 530 millones de años, a lo largo de una secuencia de etapas discontinuas y episódicas, no de acumulación gradual. La primera fauna, llamada ediacarense en honor de la localidad australiana (Ediacara) de su descubri-

1. *Vauxia* (grácil)
2. *Branchiocaris*
3. *Opabinia*
4. *Amiskwia*
5. *Vauxia* (robusta)
6. *Molaria*
7. *Aysheaia*
8. *Sarotrocercus*
9. *Nectocaris*
10. *Pikaia*
11. *Micromitra*
12. *Echmatocrinus*
13. *Chancelloria*
14. *Pirania*
15. *Choia*
16. *Leptomitus*
17. *Dinomischus*
18. *Wiwaxia*
19. *Naraoia*
20. *Hyolithes*
21. *Habelia*
22. *Emeraldella*
23. *Burgessia*
24. *Leanchoilia*
25. *Sanctacaris*
26. *Ottoia*
27. *Louisella*
28. *Actaeus*
29. *Yohoia*
30. *Peronochaeta*
31. *Selkirkia*
32. *Ancalagon*
33. *Burgessochaeta*
34. *Sidneyia*
35. *Odaraia*
36. *Eiffelia*
37. *Mackenzia*
38. *Odontogriphus*
39. *Hallucigenia*
40. *Elrathia*
41. *Anomalocaris*
42. *Lingulella*
43. *Scenella*
44. *Canadaspis*
45. *Marrella*
46. *Olenoides*

miento inicial y conocida ya en rocas de todos los continentes, consta de frondes, láminas y rodetes, estructuras muy planas y formadas por numerosos segmentos finos que se agrupan en forma de acolchados. Se debate ahora la naturaleza de la fauna ediacarense. No parece tratarse de meros precursores de formas posteriores. Quizá constituyeron un experimento de vida animal distinto que fracasó, o tal vez representaron una gama completa de organización diploblástica (de dos capas), de la que el actual *phylum* Cnidarios (corales, medusas y sus afines) queda como un remanente mínimo y alterado.

En cualquier caso, se extinguieron antes de que evolucionara la biota cámbrica. El Cámbrico empezó después, con la "pequeña fauna de conchas", un conjunto de fragmentos y piezas, de difícil interpretación. Luego, hace unos 530 millones de años, se inició otra eclosión de vida (o "pulso"), la famosa explosión del Cámbrico; durante la misma, todos los *phyla* modernos de vida animal, menos uno, dejaron huella en el registro fósil. (Este intervalo de florecimiento filético abarcó cinco millones de años.) Los Briozoos, organismos marinos sésiles y coloniales, no surgieron hasta el principio del período subsiguiente, el Ordovícico, pero este retraso bien pudiera deberse a nuestro fracaso en la búsqueda de representantes cámbricos del grupo.

Vendrían luego episodios portentosos, desde el asentamiento de los dinosaurios hasta el origen de la consciencia humana. Pero, en el fondo, fueron variaciones sobre temas establecidos durante la explosión del Cámbrico. No podemos, pues, hablar de tendencias predecibles e inexorables en la dirección del progreso y la complejidad al interpretar este cuadro: tres mil millones de años de unicelularidad, seguidos de cinco millones de años de intensa creatividad y después rematados por más de 500 millones de años de variaciones sobre pautas anatómicas ya afincadas.

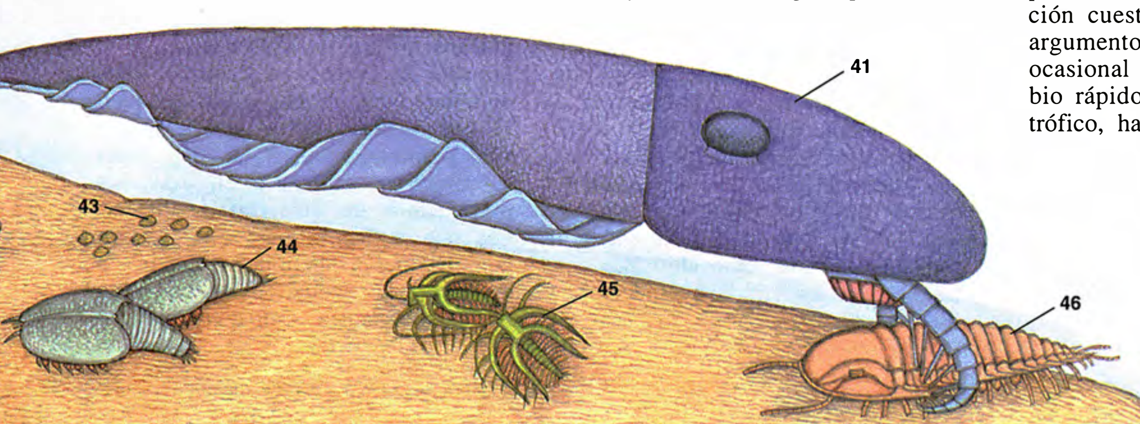
No sabemos por qué la explosión del Cámbrico logró establecer los principales tipos anatómicos con semejante celeridad. De la ecología nos llega una atractiva explicación "externa": la explosión del Cámbrico representa una ocupación inicial del "baúl ecológico" de nichos para organismos pluricelulares; cualquier experimento encontró su espacio. El baúl no se ha vaciado nunca; hasta las grandes extinciones en masa dejaron especies en cada función principal, y la ocupación del espacio ecológico por parte de éstas cerró el paso a innovaciones fundamentales. Esa explicación externalista debe complementarse con otra de carácter "interno", basada en la genética y el desarrollo: los primeros animales pluricelulares gozarían de una flexibilidad para el cambio genético y la transformación embriológica que irían perdiendo a medida que los organismos "se bloquearan" en un conjunto de patrones estables y prósperos.

Este período inicial de flexibilidad a la vez interna y externa produjo una gama de anatomías de invertebrados que podría haber excedido (en los escasos millones de años que operó) el rango entero de vida animal que respira hoy en todos los ambientes de la Tierra (tras 500 millones de años para su ulterior expansión). Las opiniones se dividen a este respecto. Para unos, la gama anatómica de esta explosión inicial superó la de la vida moderna, al haberse extinguido muchos experimentos tempranos y no haber surgido posteriormente nuevos *phyla*. Pero otros conceden que la diversidad del Cámbrico igualó, al menos, la gama moderna. Así pues, hasta la tesis más cauta sostiene que los 500 millones de años de posibilidades ulteriores no han dilatado el rango de vida animal alcanzado en el Cámbrico, conseguido en sólo cinco millones de años.

Tampoco sabemos por qué se extinguió la mayoría de los experimentos iniciales, en tanto que algunos sobrevivieron para convertirse en nuestros tipos modernos. Uno se siente tentado a afirmar que los vencedores ganaron gracias a su mayor complejidad anatómica, mejor ajuste ecológico u otra característica predecible de lucha darwinista. Pero no se aprecian rasgos distintivos que aúnen a los vencedores. Hemos, pues, de abrirnos a la alternativa radical que propone que cada uno de esos ensayos originales recibió poco más que el equivalente de un boleto en la mayor lotería que jamás se haya jugado en nuestro planeta; defiende también que cada linaje superviviente habita hoy en la Tierra más por el azar del sorteo que por cualquier lucha predecible por la existencia. La historia de la vida animal pluricelular encaja mejor en un relato de gran reducción de las posibilidades iniciales, con la estabilización de supervivientes afortunados, que en la narración al uso que habla de una expansión ecológica uniforme y de progresiva complejidad morfológica.

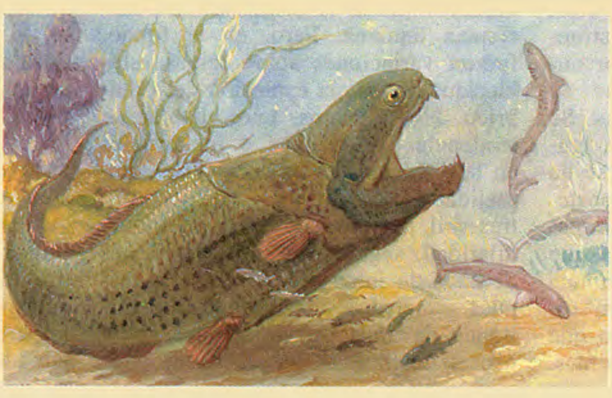
Este modelo de largos períodos de estasis, rotos por súbitos episodios de cambio que establecen nuevos equilibrios, pudiera generalizarse en varias escalas de tiempo y magnitud, para crear una suerte de estructura fractal de sibisemejanza. Según el modelo de especiación por equilibros intermitentes, las tendencias que operan en el seno de las estirpes se fraguan a través de episodios acumulados de especiación instantánea ("instantánea" a escala geológica), y no a través de cambios graduales en el interior de poblaciones continuas.

Aun cuando la teoría evolutiva implicara, para la senda de la vida, una potencial dirección interna (afirmación cuestionada por los datos y los argumentos aducidos), la imposición ocasional en el ambiente de un cambio rápido, profundo e incluso catastrófico, habría bloqueado dicha pauta.



4. DIVERSIDAD registrada en los albores de la vida pluricelular animal, durante el período Cámbrico (hace 530 millones de años). Los organismos que se ilustran aquí se encuentran en la fauna de Burgess Shale. Comprenden algunas formas familiares (esponjas, braquiópodos) que han sobrevivido. Pero muchos organismos (como el gigantesco *Anomalocaris*, abajo a la derecha, el mayor de todos los animales del Cámbrico) no resistieron mucho tiempo; su peculiaridad anatómica nos impide clasificarlos entre los *phyla* conocidos.







5. REPRESENTACIONES CLASICAS DE LA HISTORIA DE LA VIDA; revelan la distorsión dimanante de la concepción según la cual la evolución entraña un principio básico de progreso y complejidad creciente. En estas pinturas de Charles R. Knight, de un número de 1942 de la revista *National Geographic*, el primer recuadro muestra invertebrados de Burgess Shale. Pero en cuanto, por evolución, entran los peces (*2*), ya no hay escena subsiguiente que muestre ningún otro invertebrado, aunque no desaparecieron ni dejaron de evolucionar. Cuando surgen los vertebrados terrestres (*3*), se esfuman los peces, pese a ilustrarse el retorno al mar de estirpes de vertebrados terrestres (*4*). La secuencia siempre termina con mamíferos (*5*), aunque peces, invertebrados y reptiles todavía existen; y, desde luego, con seres humanos (*6*).

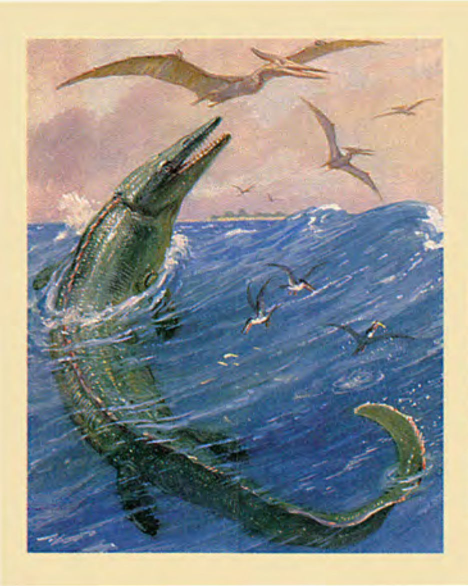
Estos cambios ambientales, que desencadenan la extinción en masa de un elevado porcentaje de especies, pueden obligar a descarrilar cualquier dirección interna, reconduciendo la senda de la vida de suerte tal que la pauta emergente parezca errática y concentrada en episodios, más que uniforme y direccional. Desde los albores de la paleontología se han venido identificando extinciones en masa; las principales divisiones de la escala de tiempo geológico se establecieron en las fronteras marcadas por tales desastres. Pero hasta las postrimerías de los años setenta, los paleontólogos solían considerar las extinciones en masa meras intensificaciones de acontecimientos ordinarios, que conducían (como máximo) a una aceleración de las tendencias reinantes en tiempos normales. En el marco de la teoría gradualista de la extinción en masa, tales episodios tardaban varios millones de años en desarrollarse (y se atribuía el carácter repentino de desapariciones y apariciones a un artefacto de un registro fósil imperfecto); se limitaban a acelerar el ritmo de los procesos ordinarios (se pensaba, por ejemplo, en una competencia darwinista más intensa en los tiempos duros, lo que conducía a una sustitución más eficaz de las formas menos adaptadas).

La nueva interpretación de las extinciones en masa las convirtió en hitos decisivos de la senda de la vida que ejercían efectos radicalmente diferentes. Luis y Walter Alvarez presentaron en 1979 datos que indicaban que el impacto de un gran objeto extraterrestre (ellos sugerían un asteroide de siete a diez kilómetros de diámetro) desencadenó la última gran extinción, en el límite entre el Cretácico y el Terciario, hace 65 millones de años. La hipótesis de los Alvarez recibiría un sólido respaldo con el descubrimiento de la "pistola humeante", un cráter del tamaño y edad apropiados situado en aguas que bordean Yucatán.

Del trabajo de David M. Raup, J. J. Sepkoski, Jr., y David Jablonski se desprende que la vida pluricelular animal ha experimentado cinco principales extinciones en masa (al final del Ordovícico, en el Devónico tardío, al final del Pérmico, al final del Triásico y al final del Cretácico) y un número mayor de episodios menores a lo largo de 530 millones de años. No tenemos pruebas evidentes de que cada uno de esos eventos, salvo el último, fuera desencadenado por un impacto catastrófico, pero sí queda establecido que las extinciones en masa fueron más frecuentes, rápidas, aniquiladoras y diferentes en su efecto que lo imaginado hasta entonces por los paleontólogos. Esas cuatro notas encierran los supuestos radicales de la extinción en masa de los que se parte para entender la senda de la vida como algo más contingente y aleatorio que predecible y direccional.

El impacto que sobre la vida producen las extinciones en masa no es azaroso. Unas estirpes sucumben y otras sobreviven según carezcan o posean características evolucionadas. Pero si la causa desencadenante de la extinción fue súbita y catastrófica, las razones para resistir o morir pueden ser independientes del valor original que tuvieran rasgos conseguidos por evolución y decisivos en las luchas darwinistas durante los tiempos normales. Este modelo de "reglas diferentes" de la extinción en masa confiere un carácter accidentado e impredecible a la senda de la vida, toda vez que los linajes no pueden anticipar futuras contingencias de tal magnitud y de acción tan dispar.

Citaré dos ejemplos de la extinción del Cretácico-Terciario, desencadenada por un impacto hace 65 millones de años. Cierto estudio publicado en 1986 señalaba que las diatomeas sobrevivieron a la extinción mucho mejor que otros grupos unicelulares del plancton (en particular, cocolitoforales y radiolarios). Observaba que muchas diatomeas habían desarrollado una estrategia de quiescencia por enquistamiento, quizá para sobrevivir a través de períodos estacionales de condiciones desfavorables (meses de oscuridad en las especies polares, fatales para estas células fotosintetizadoras, y disponibilidad esporádica del silicio necesario para construir sus esqueletos). Otras células planctónicas no habían desarrollado ningún mecanismo de vida latente. Si el impacto de finales del Cretácico produjo una nube de polvo que bloqueó la luz durante varios meses o por más tiempo, entonces las diatomeas sobrevivirían gracias a un azar, los mecanismos de quiescencia aparecidos por evolución para una función completamente distinta, a saber, la de capear las sequías estacionales en tiempos normales. Las diatomeas no





son superiores a los radiolarios ni a otros grupos planctónicos que sucumbieron en mucho mayor número; simplemente, se encontraron dotadas de un rasgo evolutivo favorable que les permitió la transición a través del impacto y sus secuelas.

Los dinosaurios perecieron al final del Cretácico, lo que dejó a los mamíferos el dominio del mundo de los vertebrados. Muchos suponen que los mamíferos resistieron estos tiempos difíciles por alguna razón de superioridad general sobre los dinosaurios. Pero tal conclusión parece improbable. Mamíferos y dinosaurios habían coexistido durante 100 millones de años; durante ese lapso los mamíferos persistieron con la talla de una rata o incluso menor, sin dar ningún "paso" para desalojar a los dinosaurios. Ante la falta de un argumento sólido que justifique el predominio de los mamíferos basado en una superioridad general, habrá que convenir en que la casualidad constituye la explicación más plausible. Parece verosímil que los mamíferos sobrevivieran gracias, en parte, a su tamaño pequeño (que posibilita poblaciones mucho mayores —resistentes, por ende, a la extinción— y con menos especialización ecológica, o más lugares donde refugiarse). Esa talla pequeña quizá no fuera una adaptación positiva para los mamíferos, sino síntoma de su incapacidad permanente para penetrar en los lares de los dinosaurios dominantes. Pero semejante carácter "negativo" en tiempos normales pudo trocarse en razón clave para su supervivencia.

Sigmund Freud acostumbraba decir que las grandes revoluciones de la historia de la ciencia compartían un rasgo singular y paradójico: derrocar la arrogancia humana de los pedestales en que se había subido. Copérnico desplazó nuestro hogar desde el centro hasta la periferia; Darwin nos relegó a un "origen animal" y Freud, con el inconsciente, hizo añicos el mito del hombre racional.

En ese sentido freudiano, la revolución darwinista sigue siendo incompleta. Aunque se acepta el hecho de la evolución, la mayoría continúa mostrándose reacia a abandonar la confortable idea de evolución entendida como progreso o preñada al menos con un principio básico de avance; progreso que haría predecible, si no inevitable, la aparición de la conciencia humana. No destruiremos el pedestal mientras continuemos defendiendo, como principio fundamental, el progreso o la adquisición de complejidad creciente, mientras no aceptemos la posibilidad de que *Homo sapiens* constituya una ramita minúscula, surgida en el último momento, del arbusto frondoso de la vida; un pequeño brote que no aparecería una segunda vez si pudiéramos replantar el arbusto desde su semilla.

Somos animales visuales. Las ilustraciones que dibujamos traicionan nuestras más profundas convicciones y exhiben nuestras limitaciones conceptuales. Los artistas pintan la historia de la vida fósil en una secuencia desde los invertebrados al hombre, pasando por peces, primeros anfibios terrestres, reptiles, dinosaurios y mamíferos.

No hay escena que muestre otro invertebrado tras la aparición de los peces, ¡pero los invertebrados no desaparecieron ni dejaron de evolucionar! Después de la llegada de los reptiles terrestres, se esfuman las representaciones de peces (los cuadros marinos pintan sólo reptiles que retornan al mar, como ictiosaurios y plesiosaurios). Pero los peces no dejaron de evolucionar una vez que una pequeña estirpe colonizó la tierra firme. La verdad es que el principal hito de la evolución de los peces, el origen de los teleósteos y su auge hasta la dominancia, aconteció durante la época de los dinosaurios, y hoy cuentan con más de la mitad de todas las especies de vertebrados. ¿Por qué colocar al hombre en el remate de todas las secuencias? Tras nuestro orden, el de los primates, antiguo entre los mamíferos, surgieron muchos otros linajes.

No completaremos la revolución de Darwin hasta que encontremos otra representación visual de la historia de la vida. J. B. S. Haldane proclamó que la naturaleza es "más excéntrica de lo que podemos suponer", pero estos límites podrían ser sólo impedimentos sociales, sin nada que ver con nuestras neuronas. Nuevas imágenes pueden hacer saltar tales herrajes. Arboles (yo diría arbustos que se ramifican copiosos y lujuriantes), y no escalas de los seres y secuencias, guardan la llave de esa transición conceptual.

Hemos de aprender a ilustrar la gama completa de la variación. Hemos de reconocer que el árbol pudo haber contenido un número máximo de ramas en los comienzos de la vida pluricelular y que la historia subsiguiente es, en su mayor parte, un proceso de eliminación y de supervivencia afortunada de unos pocos. Las ramitas apicales son brotes accidentales, no culminaciones predecibles del arbusto que las sustenta.

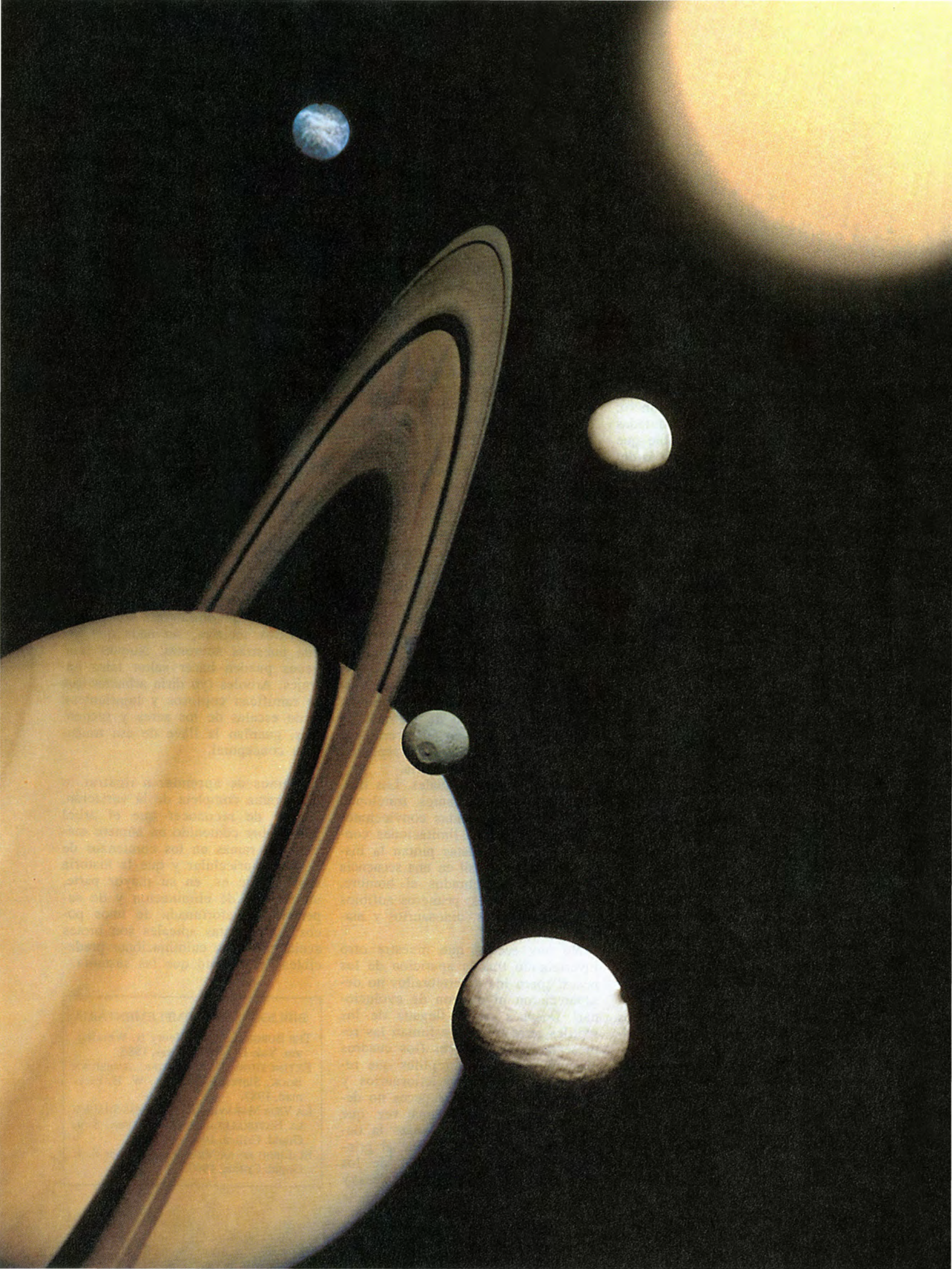
BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

THE BURGESS SHALE. Henry B. Whittington. Yale University Press, 1985.

EXTINCTION: A SCIENTIFIC AMERICAN BOOK. Steven M. Stanley. W. H. Freeman, 1987.

LA VIDA MARAVILLOSA: BURGESS SHALE Y LA NATURALEZA DE LA HISTORIA. S. J. Gould. Crítica, 1991.

EL LIBRO DE LA VIDA. Dirigido por S. J. Gould. Crítica, 1993.



La búsqueda de vida extraterrestre

La Tierra sigue siendo el único mundo habitado hasta ahora conocido, pero la investigación astronómica nos descubre que en el universo abunda la química de la vida

Carl Sagan

En los últimos decenios el hombre ha comenzado, de forma rigurosa y sistemática, la búsqueda de señales de vida en otros lugares. No se ha encontrado todavía ningún organismo a extramuros de la Tierra, pero hay motivos para mantener la fe. Sondas espaciales han identificado mundos donde la vida pudo otrora haber hallado un asidero, a pesar de que en nuestros días ya no florezca allí. La nave *Galileo* detectó signos claros de vida al pasar cerca de la Tierra, lo que nos reafirma en que somos capaces de olfatear ciertas formas de vida, cuando menos. Y se siguen acumulando indicios que inducen a pensar que en el universo abundan los sistemas planetarios parecidos al nuestro.

Hasta ahora, la inquisición sobre la búsqueda de vida en otros lugares del sistema solar se ha limitado a abordar el problema desde el punto de vista químico. Los seres humanos, y cualquier otro organismo de la Tierra, constan de agua líquida y moléculas orgánicas. (Las moléculas orgánicas son compuestos que contienen carbono, descontados el dióxido y el monóxido de carbono.) Una estrategia de exploración poco ambiciosa, que buscase condiciones necesarias, ya que no suficientes, podría comenzar por el rastreo de agua líquida y moléculas orgánicas. Tal estrategia pasaría por alto formas de vida que ignoramos, pero eso no significa que seamos incapaces de detectarlas por otros medios. Si una jirafa de bioquímica silícea se hubiera acercado a los *Viking* posados en Marte, se habría registrado su imagen.

En realidad, al centrar la atención en la materia orgánica y en el agua líquida no hay tanta estrechez de miras como pudiera parecer. Ningún otro elemento químico se aproxima siquiera al carbono en lo concerniente a la variedad y complejidad de los compuestos que puede formar; el agua líquida constituye un medio excelente y estable en el que las moléculas orgánicas pueden disolverse e interactuar. A mayores, la abundancia de moléculas orgánicas en el universo es sorprendente. Por todas partes hallamos pruebas de su existencia, desde los granos de polvo interestelar y los meteoritos hasta muchos mundos del sistema solar exterior.

Otras moléculas, el fluoruro de hidrógeno, por ejemplo, podrían acercarse al agua en su capacidad para disolver otras moléculas; pero en el cosmos escasea el flúor. Ciertos átomos, así el silicio, podrían asumir el papel del carbono en una segunda química de la vida, pero la variedad de moléculas portadoras de información que puede generar es, en comparación, muy parca. Además, el equivalente silíceo del dióxido de carbono (el dióxido de silicio, componente principal del vidrio ordinario) es un sólido y no un gas en las superficies de todos los planetas. Esta peculiaridad complicaría sin duda el desarrollo de un metabolismo basado en el silicio.

En mundos extremadamente fríos, donde el agua está convertida en hielo, algún otro disolvente —pensemos en el amoníaco líquido— podría ser clave para una bioquímica distinta. A temperaturas bajas, ciertas clases de moléculas requieren muy poca energía de activación para desarrollar reacciones químicas; ahora bien, dado que nuestros laboratorios se encuentran a temperatura ambiente y no a la temperatura de Tritón (por poner un ejemplo), que es un satélite de Neptuno, cuanto sabemos de esas moléculas podría no servirnos.

En la Tierra, las moléculas que certifican la existencia de vida son los ácidos nucleicos (ADN y ARN), que constituyen las instrucciones hereditarias, y las proteínas, las cuales, en su papel de enzimas, controlan catalíticamente la química de células y organismos. El libro de claves con que se traduce en estructura proteínica la información de los ácidos nucleicos es sustancialmente idéntico para toda la vida de la Tierra. Esta profunda uniformidad en la química de la herencia induce a pensar que cada organismo ha evolucionado a partir de un mismo origen. Y así, no tenemos forma de saber qué aspectos de la vida en nuestro planeta son necesarios (imprescindibles para todos los seres vivos, hállense donde se hallen) y cuáles contingentes (resultado de una secuencia particular de aconteceres, que, de haber sido de otro modo, pudieran haber desembocado en organismos con muy diferentes propiedades). Cabe la especulación, pero los biólogos sólo determinarán a ciencia cierta qué otras posibilidades cuando examinen la vida en otros lugares.

El lugar obvio para emprender la búsqueda de vida es nuestro propio sistema solar. Las naves espaciales han explorado más de 70 planetas,

1. TITAN, SATELITE DE SATURNO (*arriba, a la derecha, en esta imagen compuesta obtenida por el Voyager 2*), constituye un enigmático laboratorio natural de química prebiótica. Titán posee una espesa atmósfera donde se forman sólidos orgánicos complejos, que caen a modo de lluvia sobre la superficie.

CARL SAGAN regenta la cátedra David Duncan de astronomía y ciencias del espacio de la Universidad de Cornell. Ha participado en las misiones *Viking, Voyager* y *Galileo*.

satélites, cometas y asteroides. Naves que iban equipadas con magnetómetros, detectores de partículas cargadas, sistemas de obtención de imágenes e instrumentos fotométricos y espectrométricos sensibles a la gama de radiaciones que van desde el ultravioleta hasta las ondas kilométricas de radio. En el caso de la Luna, Venus y Marte, las observaciones de ingenios que se posaron en su suelo han confirmado y ampliado los hallazgos retransmitidos por las naves que los habían sobrevolado.

Ninguno de estos encuentros ha aportado datos que avalen la realidad de vida extraterrestre. Empero, tal vida, de existir, pudiera diferir por entero de las formas que nos son familiares, o presentarse sólo de modo marginal. También pudiera ocurrir que las técnicas de percepción remota utilizadas para examinar otros mundos fueran insensibles a los signos, que cabe suponer sutiles, de vida en otro mundo. La verificación más elemental de estas técnicas —la detección de vida en la Tierra por una nave que sobrevolase nuestro planeta dotada de instrumental— no se efectuó hasta muy recientemente. La nave espacial *Galileo*, de la Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio (NASA), ha rectificado tal omisión.

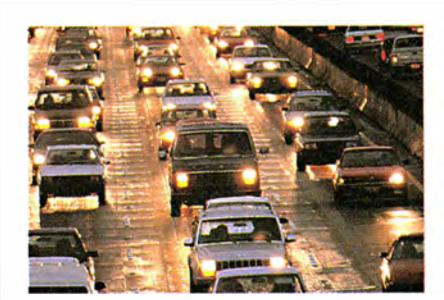
Galileo es una nave de doble función, que incorpora un orbitador en torno a Júpiter y una sonda de penetración; se encuentra ahora en el espacio interplanetario, y está previsto que alcance el sistema joviano en diciembre de 1995. Por razones técnicas, la NASA fue incapaz de enviar la *Galileo* por una ruta directa a Júpiter; se tuvo que recurrir a tres ayudas gravitatorias (dos de la Tierra y una de Venus) para encaminar a *Galileo* en su senda. El sinuoso periplo ha permitido también que efectuase observaciones de nuestro planeta desde muy poca distancia. Los instrumentos de *Galileo* no fueron diseñados para una misión de encuentro con la Tierra; fueron las circunstancias las que felizmente dieron la ocasión para un experimento de control: una investigación de vida en la Tierra utilizando una sonda planetaria. Los resultados del encuentro de la *Galileo* con la Tierra en 1990 aclararon muchas cosas.

Un observador que mirase los datos enviados por *Galileo* se percataría de ciertos hechos insólitos acerca de la Tierra. Cuando examiné con mis colaboradores los espectros tomados por *Galileo* en longitudes de onda del infrarrojo cercano (sólo un poco más largas que las de la luz roja), observé una fuerte atenuación del brillo a 0,76 micras, una longitud de onda en la cual el oxígeno molecular absorbe radiación. Lo acusado de esta absorción implica una enorme abundancia de oxígeno molecular en la atmósfera terrestre, muchos órdenes de magnitud mayor que en cualquier otro de los planetas del sistema solar.

El oxígeno se va combinando lentamente con las rocas de la superficie terrestre; por tanto, una atmósfera rica en oxígeno requiere un mecanismo de reposición de éste. Se libera algo de oxígeno cuando la luz ultravioleta procedente del Sol descompone moléculas de agua (H_2O), y los átomos de hidrógeno, por su pequeña masa, escapan hacia el espacio. Pero resulta muy difícil explicar por este proceso la gran concentración de oxígeno (20 por ciento) en la densa atmósfera terrestre.

Se comprendería tamaña abundancia de oxígeno si, en vez de la luz ultravioleta, fuera la luz visible la que pudiera escindir moléculas de agua, pues el Sol emite muchos más fotones de luz visible que de luz ultravioleta. Pero los fotones de luz visible son demasiado débiles para escindir el enlace H–OH del agua. Si hubiera alguna forma de combinar *dos* fotones de luz visible para fragmentar la molécula de agua, todo tendría fácil solución. No hay, sin embargo, forma de lograr tal hazaña —salvo con el concurso de la vida y, específicamente, de la fotosíntesis vegetal. La concentración de oxígeno molecular en la atmósfera terrestre es nuestro primer indicio de que hay vida en el planeta.

Cuando *Galileo* fotografió la Tierra, descubrió pruebas inequívocas de una nítida banda de absorción que pintaba los continentes: cierta sustancia estaba empapándose de radiación a longitudes de onda cercanas a 0,7 micras (el extremo rojo lejano del espectro visible). Ningún mineral conocido presenta tal peculiaridad, ni se ha descubierto en otro lugar,







¿En qué consiste la vida?

La búsqueda de vida extraterrestre ha de comenzar indagando qué entendemos por vida. Decir que "la reconozco cuando la veo" resulta insuficiente. Algunas definiciones funcionales son inadecuadas: se podría identificar la vida con algo que ingiere, metaboliza y excreta, pero esta descripción es aplicable a un coche o a la llama de una vela. Otras definiciones más elaboradas —por ejemplo, que la vida es reconocible por su discrepancia respecto del equilibrio termodinámico— pasan por alto la circunstancia de que gran parte de la naturaleza (el relámpago y la capa de ozono) está en desequilibrio.

Las expresiones bioquímicas —así, las definiciones de la vida que recurren a ácidos nucleicos, proteínas y otras moléculas— pecan de chauvinismo. ¿Diríamos que un organismo capaz de realizar todo cuanto hace una bacteria está muerto por la mera razón de hallarse compuesto por moléculas muy diferentes? Mi definición preferida —a saber, que la vida es cualquier sistema capaz de reproducción, de mutación y de reproducción de sus mutaciones— no resulta de aplicación práctica cuando posamos una nave espacial en otro mundo: la reproducción puede no tener lugar en público, y las mutaciones, relativamente infrecuentes.

del sistema solar. La sustancia misteriosa resulta ser, en efecto, la clase exacta de pigmento absorbente de la luz que cabría esperar si hubiera que sumar fotones visibles para escindir el agua y generar oxígeno molecular. *Galileo* detectó que ese pigmento —clorofila— cubre la mayor parte de las tierras emergidas de nuestro planeta. (Las plantas presentan color verde porque la clorofila refleja la luz verde, pero atrapa las luces roja y azul.) La prevalencia de la banda roja de la clorofila ofrece una segunda razón para pensar que la Tierra es un planeta habitado.

El espectrómetro de infrarrojos de *Galileo* detectó también trazas de metano; alrededor de una parte por millón. Aunque esa concentración pueda parecer insignificante, se encuentra en sorprendente desequilibrio con tantísimo oxígeno. En la atmósfera terrestre, el metano se oxida, produciendo agua y dióxido de carbono. Los cálculos indican que, en situación de equilibrio termodinámico, no debería quedar en la atmósfera ni una sola molécula de metano. Ciertos procesos insólitos (entre los que se cuentan el metabolismo bacteriano en ciénagas y pantanos, en los rumiantes y en las termitas) han de reponer sin cesar el suministro de metano. El profundo desequilibrio del metano constituye una tercera señal de vida en la Tierra.

Por último, el instrumento de ondas de plasma de *Galileo* recogió pulsos de emisiones electromagnéticas de banda estrecha, moduladas en amplitud, que procedían de la Tierra. Estas señales comienzan en la frecuencia en que las transmisiones de radio efectuadas en la superficie terrestre pueden empezar a filtrarse a través de la ionosfera; no se parecen a las fuentes naturales de ondas de radio, como los relámpagos y la magnetosfera terrestre. Estas señales, ordenadas e insólitas, sugieren la existencia de una civilización tecnológica. Tenemos aquí un cuarto signo de vida, el único que no lo hubiera detectado una nave similar que sobrevolase la Tierra.

La misión *Galileo* ha cumplido una función importante: se ha convertido en experimento de control de la capacidad de una nave espacial dotada de sensores remotos para detectar vida, en diversos estadios de desarrollo evolutivo, en otros mundos del sistema solar. Estos resultados nos animan a creer que podríamos detectar la "firma" reveladora de vida fuera de la Tierra. Puesto que carecemos de pruebas sólidas, cabe inferir de momento que, entre todos los cuerpos del sistema solar, en nuestro planeta existe actividad biológica.



2. LA VIDA EN LA TIERRA delata su presencia en una serie de imágenes y medidas obtenidas por la nave espacial *Galileo*. Esta imagen, en falso color, tomada en la banda de infrarrojos, revela la presencia de un misterioso pigmento absorbente de la luz roja (la clorofila, aquí en marrón-anaranjado) que cubre los continentes. No se ha observado ningún pigmento similar en otros puntos del sistema solar. Los espectros indican que la Tierra abunda en oxígeno molecular y en metano. *Galileo* ha multiplicado la confianza de los científicos en su capacidad para detectar los signos reveladores de vida, aun cuando ésta sea diferente de la terrestre.

Entre los planetas cuya superficie podemos ver, Marte es el más cercano. Tiene atmósfera, casquetes de hielo polar, estaciones y día de 24 horas. Marte parecía ser el mundo con mayores posibilidades de sustentar vida. Pero los orbitadores que lo circunvalaron no descubrieron sobreabundancia de oxígeno molecular, ni sustancia alguna que se apartase de su equilibrio termodinámico; ni tampoco ningún pigmento superficial inesperado, ni emisiones moduladas de ondas de radio. En 1976, la NASA hizo posarse sobre Marte dos sondas *Viking*. Estas iban provistas de intrumentos con sensibilidad suficiente para detectar vida incluso en los desiertos y los páramos menos prometedores de la Tierra.

Uno de los experimentos consistió en medir el intercambio de gases entre muestras de la superficie marciana y la atmósfera local en presencia de nutrientes orgánicos llevados desde la Tierra. Un segundo experimento portaba una amplia diversidad de sustancias nutritivas marcadas con un trazador radiactivo, para ver si había formas de vida en el suelo marciano que ingirieran el alimento y lo oxidaran, liberando dióxido de carbono radiactivo. El tercer experimento expuso suelo marciano a dióxido y a monóxido de carbono radiactivos, con el fin de averiguar si había microorganismos que los incorporasen.

Para general asombro, cada uno de los tres experimentos *Viking* dio lo que al principio parecieron ser resultados positivos. Se produjeron intercambios de gases, la materia orgánica experimentó oxidación y se incorporó al suelo dióxido de carbono.

Pero hay razones para que estos resultados, tan estimulantes, no se reputen pruebas en favor de la existencia de vida en Marte. Los procesos presuntamente metabólicos de microorganismos marcianos se daban en una amplia diversidad de condiciones: en humedad y en sequedad, a la luz y en la oscuridad; en frío (a temperatura apenas superior a la de congelación del agua) y en calor (cerca

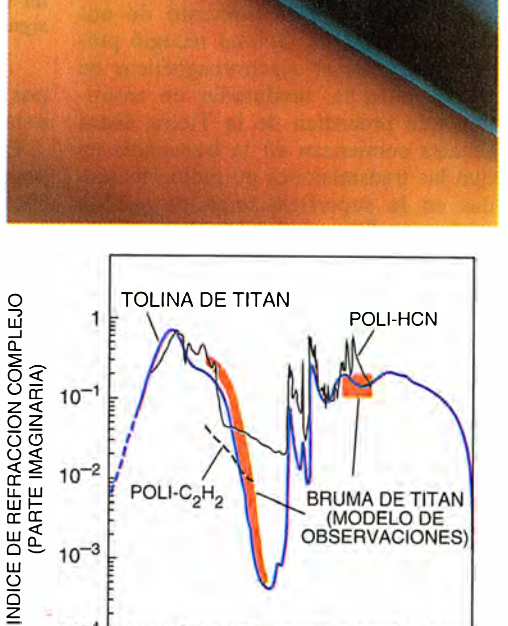
de su temperatura normal de ebullición). Muchos microbiólogos consideran inverosímil que los microorganismos marcianos pudieran poseer tales facultades en situaciones tan dispares. Otra poderosa razón para el escepticismo era que un experimento adicional destinado a buscar moléculas orgánicas en el suelo marciano produjo resultados negativos, a pesar de que la sensibilidad de los instrumentos permitía detectar tales moléculas a concentraciones en torno a una parte en mil millones. Esperábamos que cualquier forma de vida que hubiera en Marte fuera expresión de la química del carbono. El optimismo de los exobiólogos sufrió un duro golpe al no aparecer tales moléculas.

Los resultados "positivos" de los experimentos de detección de vida en las sondas *Viking* atribúyense hoy a compuestos químicos que oxidan el suelo. Dichos compuestos se forman al irradiarse la atmósfera marciana con luz ultravioleta procedente del Sol. Algunos siguen preguntándose si podría haber organismos robustos y tenaces, distribuidos tan tenuemente por el suelo marciano que sus compuestos orgánicos integrantes no resultaran detectables y sí lo fueran sus procesos metabólicos. Tales expertos no niegan la presencia de oxidantes generados por rayos ultravioletas, pero hacen hincapié en que no se han podido explicar los resultados de detección de vida de *Viking* a través de sólo oxidantes. Otros afirman con cautela haber hallado materia orgánica en cierta clase de meteoritos (los meteoritos SNC) que según se cree son fragmentos de superficie marciana arrancados y proyectados al espacio por antiguos impactos. Lo más verosímil es que el material orgánico proceda de contaminantes que penetraron en el meteorito tras su llegada a nuestro mundo. Nadie, hasta el momento, ha proclamado el descubrimiento de microorganismos marcianos en estas rocas caídas del cielo.

Por ahora resulta prudente mantener que *Viking* no ha descubierto indicios convincentes de vida en Marte. Cuatro experimentos muy diferentes, realizados con medios muy sensibles, en dos lugares separados por cinco mil kilómetros de distancia, en un planeta donde vientos rápidos transportan finas partículas en torno al globo, no encontraron signos inequívocos de vida. Las observaciones del *Viking* inducen a pensar que Marte es un planeta muerto, al menos hoy.

¿Pudo haber sido Marte sostén de vida en un pasado remoto? La respuesta depende mucho de la rapidez con que pueda emerger la vida, cuestión que ignoramos. Los astrónomos aseguran que, en su origen, la Tierra era inhóspita para la vida, a causa de la colisión de planetesimales, bloques planetarios elementales que por acreción formaron nuestro planeta. En los primeros tiempos, la Tierra estuvo recubierta de una gruesa capa de roca fundida. Tras la solidificación de ese magma, la llegada ocasional de grandes planetesimales habría puesto en ebullición a los océanos y esterilizado la Tierra, de haber surgido ya la vida en ella.





3. SIMULACION en el laboratorio de la atmósfera de nitrógeno y metano del satélite Titán (*izquierda*). Esa reproducción engendra una acumulación bituminosa de moléculas orgánicas complejas, que el autor llama tolina de Titán. Es posible que reacciones químicas análogas provoquen el espeso halo anaranjado que oscurece la superficie de Titán (*derecha, arriba*). Las características ópticas de la tolina concuerdan con las de la bruma del satélite (*derecha, abajo*). Combinada con agua líquida, la tolina produce aminoácidos, bases nucleotídicas y otras importantes moléculas de la vida terrestre. Es posible que se hayan formado moléculas de este tipo en lagos efímeros creados por impactos de cometas en la superficie de Titán.

No hubo un poco de tranquilidad hasta hace unos 4000 millones de años. Pese a lo cual, los fósiles revelan que 3600 millones de años atrás florecía en la Tierra la vida microbiana, incluso en forma de estromatolitos o colonias de microorganismos. Estas primeras expresiones de vida parecen haber sido muy eficaces en su bioquímica. Muchas fotosintetizaban y contribuyeron a la atmósfera terrestre, rica en oxígeno. Manfred Schidlowski ha estudiado las concentraciones relativas entre isótopos de carbono preservado en rocas; su trabajo ha proporcionado (controvertidos) indicios de que la vida florecía ya hace 3800 millones de años.

El tiempo hábil para el origen de la vida se está estrechando desde dos flancos. Tal intervalo pudo haber sido de sólo 100 millones de años. La primera vez que llamé la atención sobre este "pinzamiento" (en 1973, al poco de que las muestras lunares traídas por *Apolo* aclarasen la cronología de los impactos en la Luna), defendí que la rapidez con que afloró vida en la Tierra tenía que implicar que se trataba de un proceso probable. La extrapolación a partir de experiencias únicas es, obviamente, peligrosa, pero sería una circunstancia singular que la vida surgiese con presteza aquí y no lo hiciera, dado un tiempo comparable, en mundos parecidos.

También las condiciones de Marte hace entre 4000 y 3800 millones de años pudieron haber favorecido el nacimiento de la vida. La superficie está quebrada por cursos presumibles de antiguos ríos, lagos e incluso océanos de más de 100 metros de profundidad. El Marte de hace 4000 millones de años era mucho más húmedo y cálido que el de hoy. Tomadas en conjunto, estas informaciones fragmentarias sugieren que pudo haber surgido la vida en ese planeta. De ser así, al ir Marte evolucionando y pasar de acogedor a desolado, la vida se hubiera asido a los últimos refugios subsistentes; en lagos salinos tal vez, o en lugares donde el calor interior ha fundido el permafrost (hielo perpetuo).

La química orgánica se ha propagado a placer por el sistema solar y aun más allá. Marte tiene dos pequeños satélites, Fobos y Deimos, que a causa de su color oscuro parecen estar formados (o al menos recubiertos) de materia orgánica. Se supone que se trata de asteroides capturados, procedentes de regiones mucho más externas del sistema solar. A decir verdad, parece existir una vasta población de pequeños mundos cubiertos de materia orgánica: los asteroides de tipos C y D del cinturón principal, situado entre Marte y Júpiter; los núcleos de cometas, como el célebre de Halley; y la nueva clase de asteroides recientemente descubiertos cerca de los planetas exteriores. En 1986 la nave *Giotto*, de la Agencia Europea del Espacio, voló a través de la nube de polvo que envuelve al cometa Halley, revelando que el núcleo de éste puede estar formado por hasta un 25 por ciento de materia orgánica.

Se cree que las condritas carbonáceas, un tipo bastante abundante de meteoritos hallado sobre la Tierra, son fragmentos procedentes de asteroides de tipo C del cinturón principal. Los meteoritos carbonáceos contienen un residuo orgánico rico en hidrocarburos aromáticos y de otras clases. Se ha identificado, asimismo, cierto número de aminoácidos y de bases nucleotídicas.

Los fragmentos procedentes de asteroides y cometas que se zambulleron en la atmósfera de la Tierra primitiva portaron consigo vastas reservas de moléculas orgánicas. Algunas de éstas sobrevivieron al intenso calentamiento de la penetración en la atmósfera y pudieron, por consiguiente, haber efectuado una contribución sustancial al comienzo de la vida. Los impactos podrían haber proporcionado a otros mundos un suministro similar de materia orgánica, amén de agua. Para que se dieran los pasos críticos de la química prebiológica no sería necesario que estos mundos gozaran de la abundante cantidad de agua líquida de la Tierra. El agua podría hallarse en charcas, en reservorios subsuperficiales, envolviendo en finas películas granos minerales o en deshielos causados por impactos.

Uno de los mundos más fascinantes e ilustrativos de la química orgánica prebiológica lo ejemplifica Titán, satélite gigante de Saturno. Podemos ver en él cómo se desarrolla la síntesis de complejas moléculas orgánicas. La masa de su atmósfera decuplica la terrestre; está compuesta principalmente de nitrógeno molecular, además de metano en una concentración que va de unas unidades percentuales hasta el 10 por ciento. Cuando *Voyager 2* se aproximó a Titán, en 1981, no pudo observar la superficie, porque este planeta está enteramente envuelto en un halo rojizo y opaco. La temperatura de la superficie es muy baja, alrededor de 94 grados kelvin (–179 grados Celsius). A juzgar por su densidad (muy inferior a la de la roca sólida), Titán ha de tener una gran cantidad de hielo sobre su superficie y en su vecindad. Unas cuantas moléculas orgánicas simples —hidrocarburos y nitrilos— resultan ser constituyentes minoritarios de la atmósfera del satélite.

Luz ultravioleta procedente del Sol, partículas dotadas de carga eléctrica atrapadas en la magnetosfera de Saturno y rayos cósmicos bombardean la atmósfera de Titán y desencadenan allí reacciones químicas. Cuando W. Reid Thompson y el autor tuvieron en cuenta los efectos de la irradiación ultravioleta y simularon los correspondientes a los electrones aurorales, hallaron que los resultados coincidían bastante bien con las concentraciones observadas de constituyentes orgánicos.

Con Bishun N. Khare simulé la presión y la composición de los niveles apropiados de la atmósfera de Titán y lo irradiamos con partículas cargadas. El experimento produjo un sólido orgánico y oscuro, al que llamamos tolina de Titán, de la voz griega que significa "fangoso". Al medir las constantes ópticas de la tolina descubrimos que coinciden con las constantes ópticas deducidas de las observaciones de la bruma de Titán. Ningún otro de los materiales propuestos se aproxima siquiera.

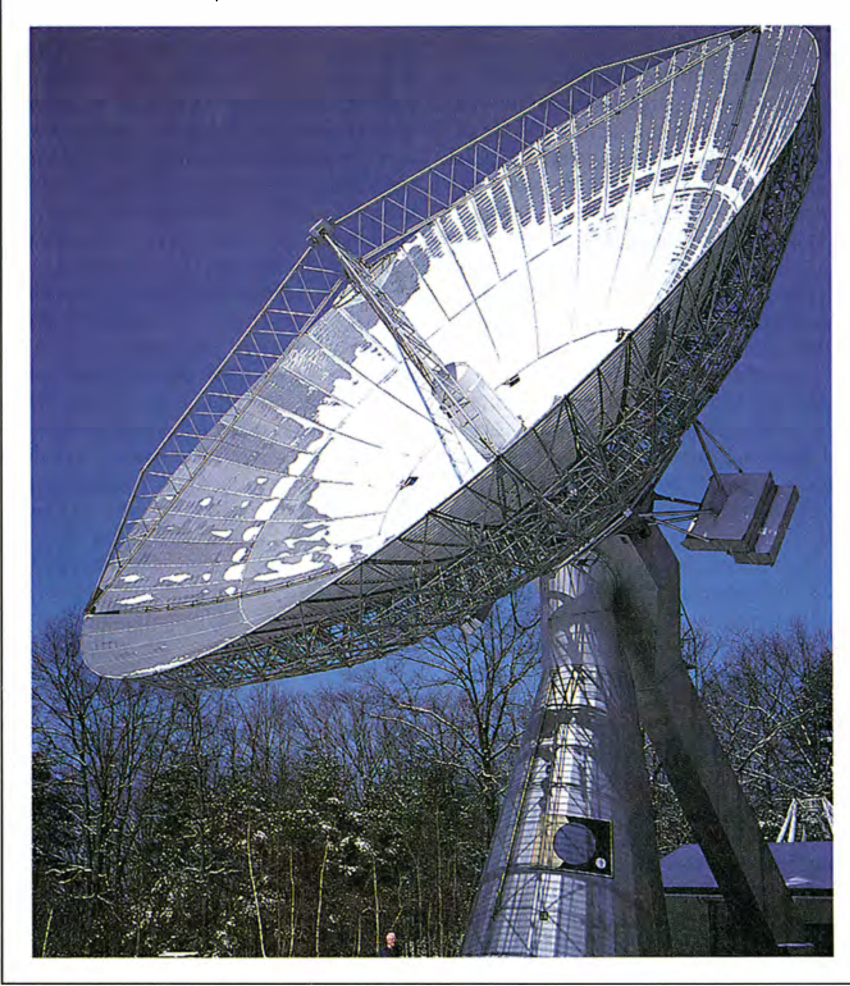
En la alta atmósfera de Titán se forman sin cesar moléculas orgánicas que van cayendo al tiempo que se generan nuevas tolinas en el aire de capas superiores. Si este proceso ha continuado a lo largo de los últimos 4000 millones de años, la superficie de Titán ha de estar cubierta por decenas —centenares, tal vez— de metros de tolina y de otros productos orgánicos. Además, Thompson y yo hemos calculado que, a lo largo de la historia del sistema solar, una ubicación típica de Titán tiene más o menos una probabilidad del cincuenta por ciento de haber contado durante siglos con agua producida por el calor liberado en impactos. Al mezclar en el laboratorio agua líquida con tolina, sintetizamos aminoácidos. Existen también trazas de bases nucleotídicas, de hidrocarburos aromáticos policíclicos y un maravilloso brebaje de otros compuestos. Si bastaron 100 millones de años para que se originase vida en la Tierra, ¿podrían ser suficientes 1000 años en Titán? ¿Podría haber dado comienzo la vida durante los siglos consecutivos a un impacto, al formarse lagos de agua o lodazales de agua-hielo?

Al mirar más allá de nuestro sistema solar, penetrando en el gas y los gránulos que pueblan el espacio interestelar, volvemos a encontrar

¿Existe vida inteligente en otros mundos?

En la búsqueda de inteligencia extraterrestre se utilizan grandes radiotelescopios, receptores muy perfeccionados y modernos métodos de análisis de datos con el fin de detectar hipotéticas señales dirigidas hacia nosotros por civilizaciones avanzadas residentes en planetas de otras estrellas. Hay grandes incertidumbres en la selección de la longitud de onda adecuada, banda útil de frecuencias, polarización, constante de tiempo y algoritmo de decodificación con que realizar la búsqueda de dichas señales. Sin embargo, la radiotecnología es poco costosa, puede alcanzarse en los primeros estadios de una civilización tecnológica, es fácilmente detectable (no sólo a distancias interplanetarias, como lo ha hecho *Galileo*, sino a vastas distancias interestelares) y es apta para transmitir ingentes cantidades de información. El primero de los programas de exploración sistemática a gran escala, que cubría una fracción importante de las longitudes de onda consideradas óptimas para comunicaciones interestelares, lo inició la NASA el 12 de octubre de 1992. El Congreso canceló el proyecto un año después, que será resucitado pronto con financiación privada.

Uno de los proyectos más prometedores es META, dirigido por Paul Horowitz, profesor de física en la Universidad de Harvard, financiado básicamente por la Sociedad Planetaria, el mayor grupo del mundo interesado en el espacio. Vemos en la foto la antena utilizada por META. Tras cinco años de ininterrumpido examen del espacio y de dos años de seguimiento, Horowitz y el autor han descubierto unas cuantas señales de radio de anchura de banda sumamente estrecha, que no parecen compartir la rotación terrestre ni son atribuibles a fuentes específicas de ruido o interferencia. La única dificultad estriba en que ninguna de estas fuentes es repetitiva y, en ciencia, los datos no repetitivos suelen carecer de valor. El aspecto pasmoso de los hallazgos META es que las cinco señales más fuertes yacen todas en el plano de la Vía Láctea. La probabilidad de que tal alineación se deba al azar ronda en torno al 0,5 por ciento.

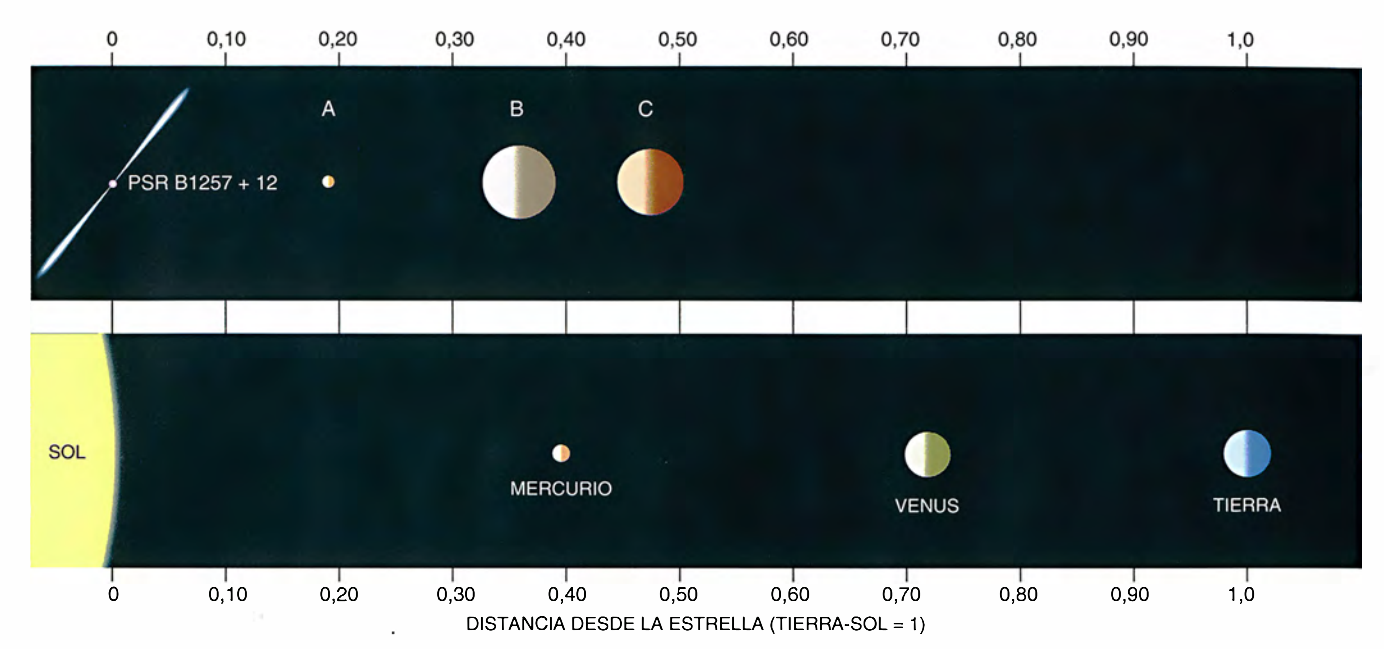


signos de química orgánica. En el examen de microondas emitidas y absorbidas por moléculas a frecuencias características se han identificado en el espacio interestelar una cincuentena de compuestos orgánicos sencillos: hidrocarburos, aminas, alcoholes y nitrilos, algunos de los cuales poseen largas cadenas de carbonos, como el $HC_{11}N$. Cuando hay una nube interestelar interpuesta entre la Tierra y alguna fuente de infrarrojos más alejada, podemos determinar qué longitudes de onda del infrarrojo son absorbidas por los gránulos e inferir, por ende, su composición.

Se admite que algunas de las longitudes de onda infrarrojas ausentes las han absorbido compuestos aromáticos policíclicos, que son hidrocarburos complejos similares a los que hallamos en alquitranes de carbón. En la porción de espectro infrarrojo próximo a las 3,4 micras se observan tres bandas de absorción diferenciadas. La misma pauta se aprecia en los espectros de los cometas, en las tolinas formadas por irradiación de hidrocarburos congelados y en la materia orgánica de origen meteorítico. Esta "huella dactilar" del infrarrojo está causada, probablemente, por grupos concatenados (alifáticos) de carbono y de hidrógeno: $-CH_3$ y $-CH_2$. El equipo de Yvonne Pendleton afirma que la concordancia espectral óptima parece ser con materia orgánica meteorítica.

La concordancia en el infrarrojo entre cometas, asteroides y nubes interestelares puede suponer la primera prueba directa de que los asteroides y los cometas contienen materia orgánica, originada en granos interestelares antes de su agregación en el sistema solar. Pero los datos se prestan también a la interpretación contraria, a saber, que parte de la materia orgánica que se formó en la nebulosa solar primigenia se acumuló en asteroides y cometas, y que otra parte fue eyectada por el Sol al espacio interestelar. Si otros 100.000 millones de estrellas hicieran otro tanto, podría justificarse la existencia de una porción significativa de la materia orgánica que hay en los granos interestelares de la galaxia. La abundancia de materia orgánica en el sistema solar exterior, en los cometas provenientes de allende el último planeta y en el gas y los granos interestelares inducen vigorosamente a pensar que la materia orgánica compleja —la que tiene relación con el origen de la vida— está ampliamente difundida por toda la Vía Láctea.

Sin embargo, las moléculas orgáni-



4. PLANETAS EXTRASOLARES orbitan, al parecer, en torno a la estrella PSR B1257+12, un residuo de la explosión de una antigua supernova, diminuto y muy denso. Las separaciones entre los tres planetas que la circundan —conocidos por A, B y C— recuerdan a las de nuestro sistema solar (los tamaños de los planetas no están dibujados a escala). Es posible que un planeta habitable, más distante, circunvale también a este cadáver estelar. Se multiplican las pruebas de la existencia de sistemas planetarios en torno a muchas estrellas similares al Sol, que ofrecen mejores expectativas para la vida.

cas que pueda haber en granos interestelares secos como el hueso, abrasados por la luz ultravioleta y los rayos cósmicos, parecen improbable habitáculo para el origen de la vida. Todo indica que la vida exige agua en estado líquido, que, a su vez, requiere planetas. Las observaciones astronómicas muestran que los sistemas planetarios son cosa corriente. Un número alto de estrellas jóvenes cercanas, de masa similar a la solar, están circundadas por el tipo de disco de gas que los científicos —remontándose a Immanuel Kant y a Pierre Simon de Laplace— afirman ser necesario para explicar el origen de los planetas de nuestro sistema. Estos discos proporcionan indicios persuasivos, aunque todavía indirectos, de que en torno a otras estrellas existe una multitud de planetas, algunos, presumiblemente, similares a la Tierra.

George W. Wetherill ha creado modelos pormenorizados para predecir la distribución de los planetas que se formarían en tales discos circunestelares. James F. Kasting, por otro lado, ha calculado el intervalo de distancias a sus soles en los que los planetas pueden mantener agua líquida en sus superficies. Tomadas conjuntamente, estas dos líneas de indagación sugieren que un sistema planetario típico podría tener uno e incluso dos planetas similares a la Tierra orbitando a distancias en las que puede haber agua.

Hace poco, Alexander Wolszczan detectó planetas terrestres donde menos esperaban los astrónomos: en torno a un púlsar, estrella de neutrones en rápida rotación sobre sí misma que es residuo de la explosión de una supernova. Basándose en las variaciones de sincronía de las radioemisiones procedentes del púlsar PSR B1257+12, Wolszczan ha deducido la existencia de tres planetas (A, B y C) alrededor del púlsar.

Esos mundos se encuentran más próximos a su estrella que la Tierra está a la nuestra. PSR B1257+12 emite en forma de partículas cargadas una energía varias veces superior a la que el Sol libera en radiación electromagnética. Si todas las partículas cargadas interceptadas por A, B y C se transforman en calor, tales mundos habrán de estar, casi con certeza, demasiado calientes para la vida. Pero Wolszczan halla indicios de un planeta adicional, por lo menos, situado a mayor distancia del púlsar. Que sepamos, este sistema tan poco prometedor en apariencia, situado a 1400 años luz de la Tierra, pudiera alojar un planeta oscuro, aunque habitable. No está claro si los planetas en cuestión son supervivientes de tiempos anteriores a la explosión de la supernova o, si, como es más probable, se formaron después, a partir de restos de la región circundante. Sea como fuere, su presencia sugiere que la formación planetaria es un proceso habitual y difundido.

Hay en marcha numerosos rastreos de planetas en sistemas similares al solar, maduros y recientes. El ritmo de exploración se está acelerando tanto, y son tantas las técnicas que están a punto de llevarse a ejecución, que parece verosímil que en los próximos decenios dispongamos de un nutrido inventario de planetas en torno a las estrellas cercanas.

Tenemos toda clase de razones para creer que hay muchos mundos ricos en agua y parecidos al nuestro, dotados de un generoso complemento de moléculas orgánicas complejas. Aquellos planetas que orbiten en torno a estrellas similares al Sol podrían ofrecer ambientes donde la vida dispondría de miles de millones de años para surgir y evolucionar.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

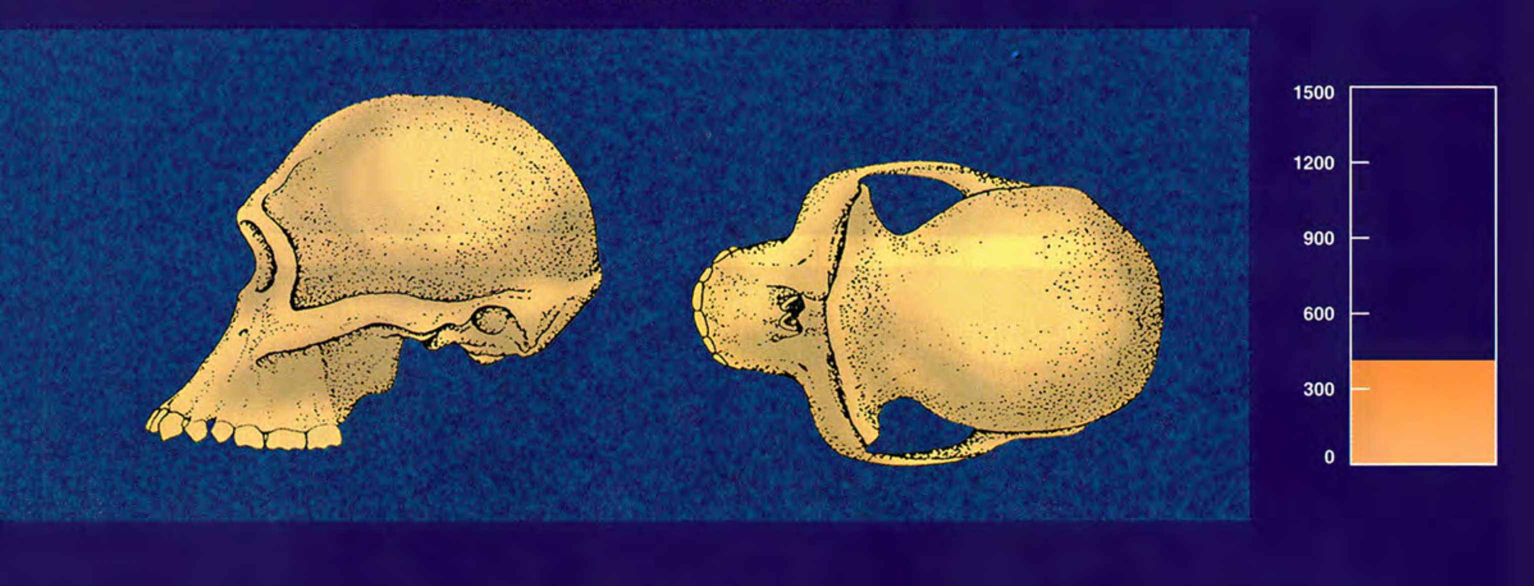
MARS. Dirigido por H. H. Kieffer, B. M. Jakosky, C. Snyder y M. S. Matthews. University of Arizona Press, 1992.

TITAN: A LABORATORY FOR PREBIOLOGICAL ORGANIC CHEMISTRY. Carl Sagan, W. Reid Thompson y Bishun N. Khare, en *Accounts of Chemical Research*, vol. 25, n.º 7, págs. 286-292; julio de 1992.

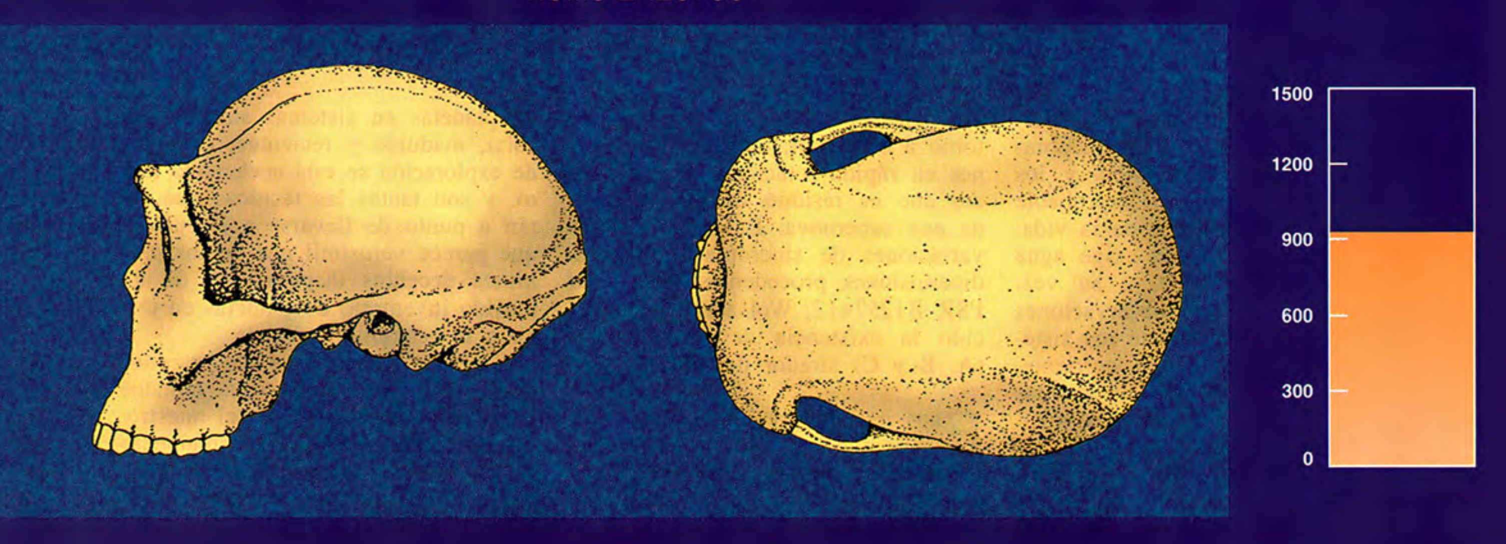
FIVE YEARS OF PROJECT META: AN ALL-SKY NARROW-BAND RADIO SEARCH FOR EXTRATERRESTRIAL SIGNALS. Paul Horowitz y Carl Sagan en *Astrophysical Journal*, vol. 415, n.º 1, páginas 218-233; 20 de septiembre de 1993.

A SEARCH FOR LIFE ON EARTH FROM THE GALILEO SPACECRAFT. Carl Sagan *et al.* en *Nature*, vol. 365, n.º 6448, páginas 715-721; 21 de octubre de 1993.

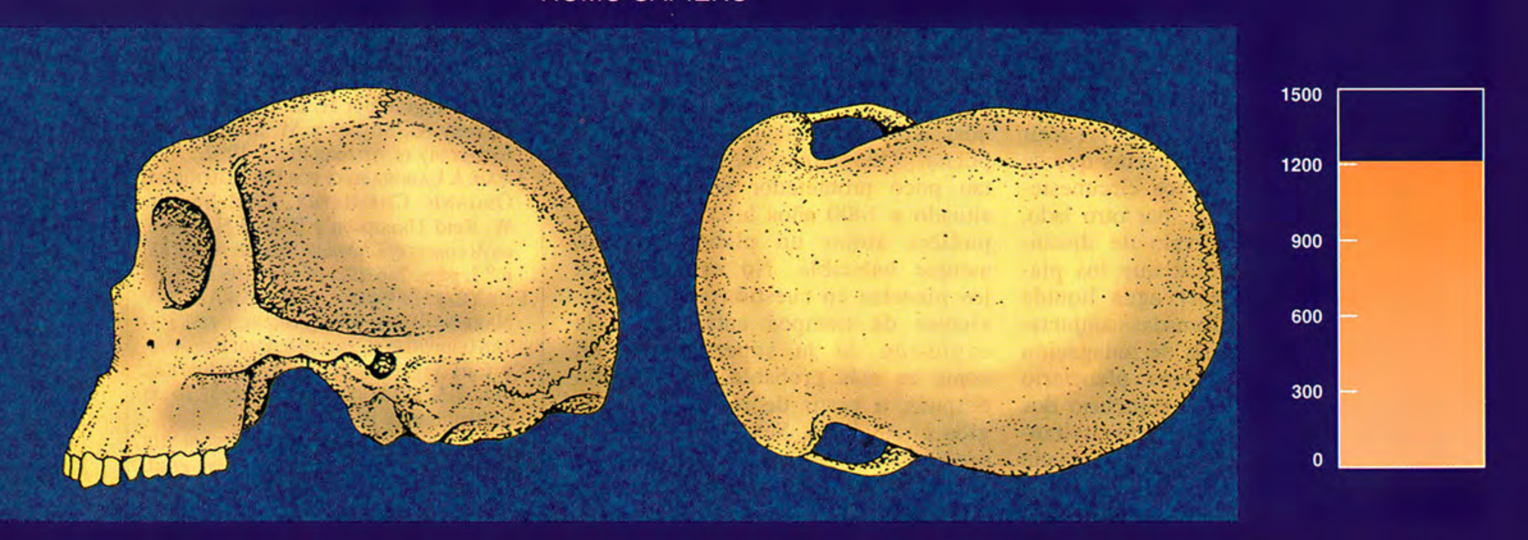
AUSTRALOPITHECUS AFRICANUS



HOMO ERECTUS



HOMO SAPIENS



Capacidad cerebral y evolución humana

Los cambios de mayor alcance experimentados en la sociedad humana han ido acompañados de un descenso progresivo del tamaño de nuestro cerebro

Robert D. Martin

Los humanos diferimos de nuestros parientes más cercanos, los monos antropomorfos, en tres rasgos biológicos principales. De los tres nos habla el registro fósil: aumento general del tamaño del cerebro, locomoción en bipedestación erguida y remodelación del aparato mandibular.

El cerebro humano, con un volumen medio de 1230 centímetros cúbicos, es unas tres veces mayor que el de los grandes primates (385 cc en el chimpancé común, 405 cc en el orangután y 495 en el gorila). El modelo humano de marcha bípeda, singular en el reino animal, ha comportado la aparición de notables diferencias, en la forma y la función, entre humanos y grandes primates. Por último, las mandíbulas y los dientes han sido objeto de una transformación radical en los humanos; el cambio más evidente lo advertimos en la reducción drástica del tamaño de los caninos, que, desde el punto de vista funcional, han abandonado su aspecto de daga para semejarse a los incisivos.

Los expertos en evolución que estudian el origen del hombre se afanan por seguir la pista de tales cambios en el registro fósil e identificar los factores responsables. Como meta final, buscan desarrollar una síntesis capaz de explicar, en un marco evolutivo global, la magnitud de ese cerebro, la bipedestación y las modificaciones dentarias.

La evolución del cerebro humano ha atraído particular atención porque parece obvio que el éxito de nuestra especie se debe, sobre todo, a su preeminente inteligencia. Asimismo parece lógico que la inteligencia tenga que ver, hasta cierto punto, con el notable tamaño de nuestro cerebro. Estudios realizados sobre el tamaño del cerebro y sus implicaciones en la conducta han desempeñado, por consiguiente, un papel destacado en la investigación de la evolución humana.

Pero el análisis del tamaño cerebral constituye una cuestión compleja. En primer lugar, depende en buena medida del tamaño general del cuerpo. Si tomamos una serie de mamíferos que difieran sobre todo en la talla, como los felinos o las diversas razas de perros domésticos, observaremos que los de talla mayor presentan también cerebro mayor. Abundando más, el cerebro del elefante (el mamífero terrestre de mayores proporciones) cuadruplica, en volumen, el cerebro humano; parece claro que esto se debe fundamentalmente al impresionante tamaño del cuerpo del elefante y no a una inteligencia superior.

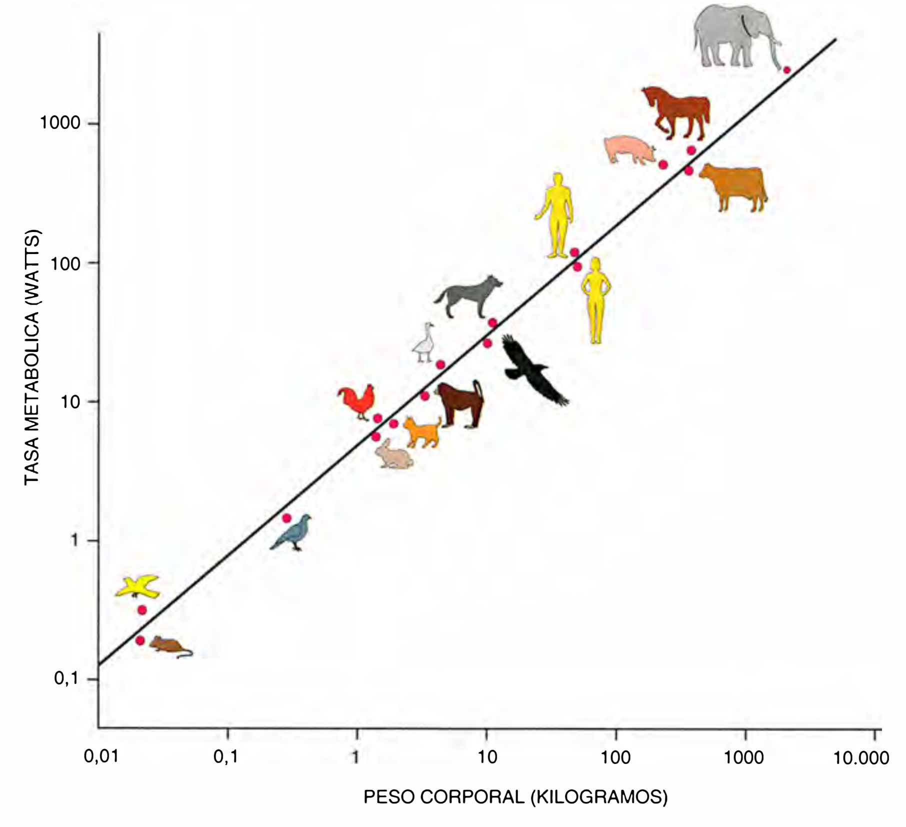
Si deseamos comparar tamaños cerebrales de diferentes mamíferos, debemos encontrar un camino que nos permita eliminar el efecto correspondiente al tamaño corporal. No nos sirve, sin embargo, acudir a una proporción simple que relacione el tamaño del cerebro con el total del cuerpo (un porcentaje, por ejemplo). Si así lo hiciéramos, crearíamos un sesgo en favor de las especies de tamaño pequeño; por dar unas cifras esclarecedoras: el cerebro humano representa el 2 % del tamaño corporal medio, en tanto que en los primates más pequeños, como el primitivo lemur ratón (con un peso corporal medio de 60 gramos), representa más del 3 %. La razón de esa discrepancia porcentual estriba en lo siguiente: aunque el tamaño del cerebro aumenta en general con el incremento del cuerpo, la relación describe una curva retardadora.

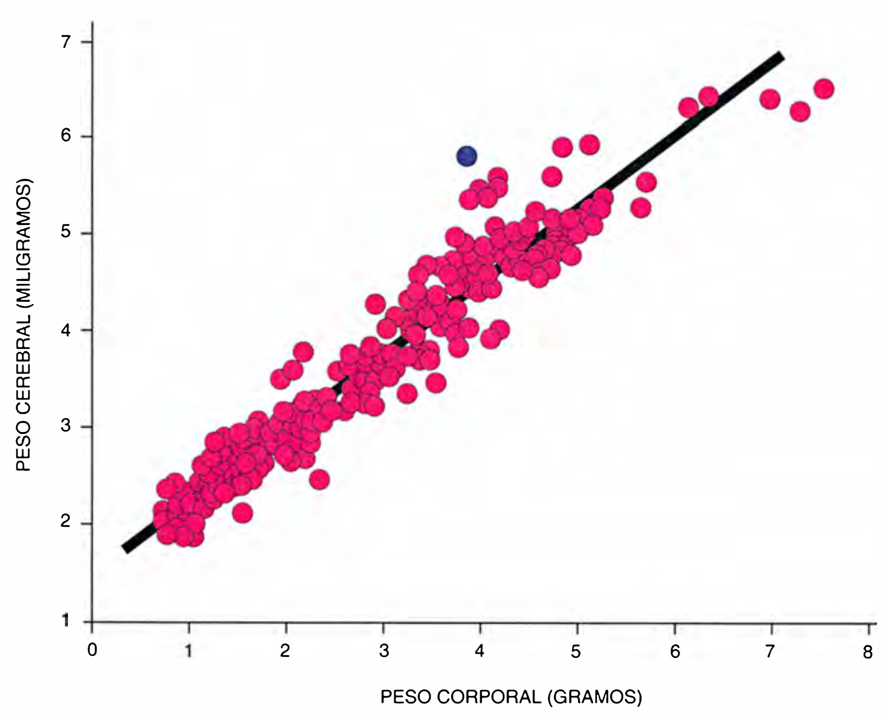
En matemáticas definiríamos esa relación mediante una función exponencial simple, que puede convertirse en una línea recta transformando en logaritmos los valores del tamaño cerebral y del tamaño corporal. Este sencillo procedimiento es fundamental en el campo del *análisis alométrico*, que examina las relaciones de escala entre diversos rasgos biológicos y el tamaño corporal. (Entiéndese por escala el ajuste proporcional de un carácter a la variación del tamaño corporal.) Si se traza una línea sobre la representación logarítmica, la línea describe la relación general de escala. Las distancias que separan, a cada especie, de la línea (expresadas por sus valores residuales) reflejan adaptaciones particulares.

En el caso de la representación logarítmica del tamaño cerebral de los mamíferos en función de su tamaño corporal, se observa que el punto correspondiente a los seres humanos muestra la mayor desviación positiva de la recta (*figura 2*). En otras palabras, cuando se comparan con otros mamíferos, los humanos demuestran tener efectivamente cerebros más grandes en relación con su tamaño corporal. Disponemos, pues, de una forma

1. CRANEOS DE TRES ETAPAS representativas en la evolución del cerebro humano, de arriba abajo: *Australopithecus africanus* (volumen cerebral medio: 440 centímetros cúbicos), *Homo erectus* (volumen cerebral medio: 940 cc) y *Homo sapiens* (volumen cerebral medio: 1230 cc). *Homo habilis* tenía un volumen cerebral medio de 640 cc. Adviértase que el cráneo de *Australopithecus africanus* procede de un individuo mucho más pequeño que los de *Homo erectus* y *Homo sapiens* (Ilustración reelaborada a partir de *Primate Origins and Evolution*, por R. D. Martin, 1990).

ROBERT D. MARTIN se formó en la Universidad de Oxford. Experto en primatología evolutiva, dirige el Museo e Instituto Antropológico de la Universidad de Zurich.





2. REPRESENTACION LOGARITMICA del metabolismo basal (*arriba*) y del peso cerebral (*abajo*) en función del tamaño corporal. Ambas representaciones tienden a caer a lo largo de una línea recta. En la figura superior, de acuerdo con la ecuación de Kleiber los micromamíferos presentan un metabolismo basal, por peso corporal unitario, mayor que los grandes mamíferos. La representación logarítmica del peso cerebral en función del corporal recoge una muestra de 477 especies de mamíferos. El punto correspondiente a los humanos actuales (*mostrado en negro*) se encuentra muy por encima de la línea que muestra la tendencia general de escala, lo que demuestra que, en relación con su tamaño corporal, los seres humanos poseemos un cerebro mayor. Los siete puntos más próximos al humano corresponden a los cetáceos dentados (delfines y sus parientes). La línea de mejor ajuste indica que el tamaño cerebral guarda una razón de escala de 0,75 con el tamaño corporal.

fiable de comparar los seres humanos con otras especies (vivas y fósiles) al tomar en consideración el efecto de escala no lineal del tamaño corporal.

Suele afirmarse que todos los primates, y no sólo los humanos, desarrollan un cerebro mayor que el resto de los mamíferos. Por supuesto, esto no puede predicarse del tamaño cerebral absoluto. Como ya mencioné, los elefantes tienen cerebros mucho mayores que los seres humanos y lo mismo ocurre en las ballenas. Tampoco la aseveración es cierta cuando se consideran proporciones simples entre tamaño cerebral y tamaño corporal, porque, *caeteris paribus*, el cerebro representa un porcentaje mucho más alto de tamaño corporal en los micromamíferos. Así, en murciélagos y ratones, la razón de cerebro a cuerpo es muy superior a la de cualquier primate y llega a decuplicar la correspondiente proporción en humanos.

¿Qué ocurre, sin embargo, si eliminamos el efecto de escala del tamaño corporal con una representación logarítmica como la mostrada en la figura 2? Exactamente, y dejando de lado a los humanos, en los mamíferos los mayores tamaños cerebrales, relativos, no se encuentran en los otros primates, sino en los delfines y sus parientes. En los primates no humanos y otros mamíferos se observa un notable solapamiento del tamaño cerebral en relación al corporal; hay incluso unas cuantas especies de primates en las que el tamaño relativo del cerebro se halla por debajo de la media de mamíferos. Por consiguiente, a la pregunta planteada al inicio del párrafo respondemos que el cerebro de los primates adultos y distintos de los humanos no es mayor que el del resto de los mamíferos. Lo máximo que podemos afirmar es que existe una tendencia general a que el cerebro sea relativamente grande en la mayoría de los primates.

Con todo, la investigación ha demostrado que *sí hay* una notable diferencia entre primates y otros mamíferos en lo concerniente al cerebro. Esta diferencia radica en el desarrollo fetal del cerebro, y no en el tamaño del mismo en un individuo adulto. En los mamíferos no primates, el tejido cerebral representa alrededor del 6 % del peso corporal en todas las etapas del desarrollo fetal, mientras que en los primates el porcentaje se acerca al 12 %. Dicho de otra forma, si consideramos una etapa cualquiera del desarrollo uterino, un feto de primate tendrá el doble de tejido cerebral que un feto no primate del mismo peso corporal. En este sentido estricto, sí es cierto que los primates tienen un ce-

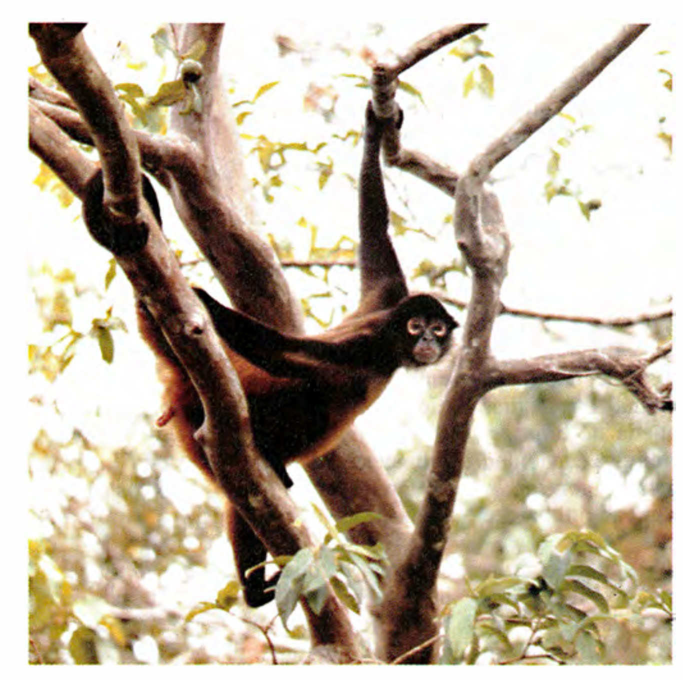
rebro mayor que los otros mamíferos. La diferencia sigue viéndose todavía clara en el nacimiento, pero la discrepancia entre primates y otros mamíferos se eclipsa ante la disparidad de crecimiento posnatal del cerebro y de crecimiento posnatal del cuerpo. Aunque obscurecida, la distinción encierra su interés, ya que significa que los primates empiezan la vida extrauterina con un cerebro mayor (en relación con su tamaño corporal inicial) que el de los demás mamíferos. Como explicaremos más adelante, este fenómeno tiene importantes implicaciones para el gasto energético.

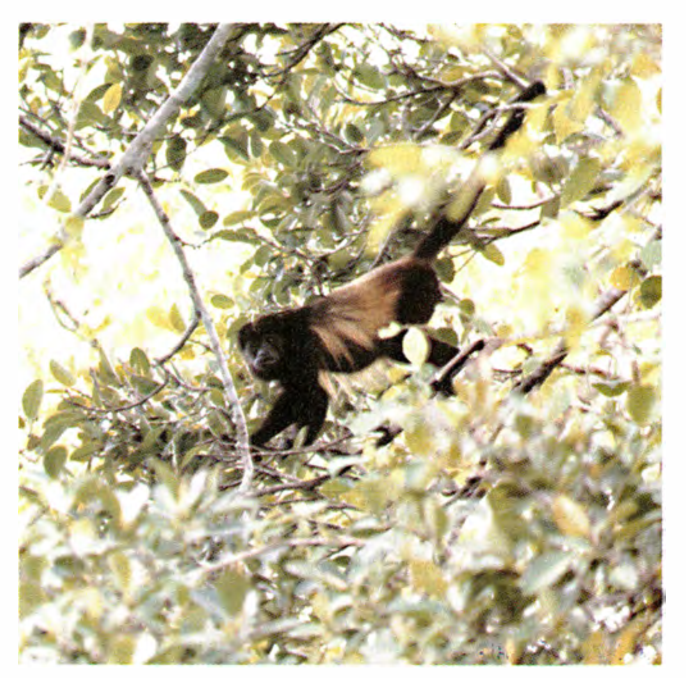
Se han ido elaborando diversas teorías para justificar el motivo de semejante incremento del tamaño cerebral en el curso de la evolución. Algunas se ocupan sólo de los humanos y pueden contrastarse con el registro fósil disponible. Podemos aquí tomar *Australopithecus africanus* (aparecido hace 3 millones de años), *Homo habilis* (2 millones de años), *Homo erectus* (1 millón de años) y *Homo sapiens* a modo de secuencia de estadios representativos, aunque podemos afirmar, con certeza casi absoluta, que no constituyen un linaje evolutivo directo (*figura 1*).

De acuerdo con cierta hipótesis, la fabricación de útiles proporcionó el impulso inicial para la expansión del cerebro humano y el refinamiento creciente de los mismos estableció una conexión causal directa con el aumento progresivo del tamaño cerebral. A primera vista, esta explicación parece encajar en el registro fósil. El tamaño cerebral medio de *Australopithecus africanus* (440 cc) se encuentra dentro del intervalo correspondiente a las especies modernas de grandes primates (385-495 cc), y los primeros indicios de un volumen cerebral superior aparecen en especímenes atribuidos a *Homo habilis* (640 cc). Da la casualidad de que los primeros útiles líticos fidedignamente identificables emergen en el registro fósil por la misma época en que lo hacen los primeros representantes del género *Homo*. Son varios los investigadores que ven aquí la confirmación de la vinculación propuesta entre el uso de herramientas y la expansión del cerebro humano. Pero esta conclusión ignora la relación de escala entre tamaño cerebral y tamaño corporal. Todos los cráneos de *Australopithecus africanus* en los que podemos medir el volumen cerebral proceden de individuos pequeños, con un peso corporal medio de unos 30 kg, por debajo del rango en que se mueven los monos antropomorfos modernos. Cuando se tiene en cuenta el efecto de escala del tamaño corporal, se observa que el volumen cerebral relativo de los monos antropomorfos no difiere del de los monos, mientras que el tamaño cerebral relativo de *Australopithecus africanus* es al menos un 50 % mayor. De ello se infiere que la expansión del cerebro —con respecto al tamaño corporal— precedió a la fecha de aparición de cualquier útil lítico en el registro fósil homínido.

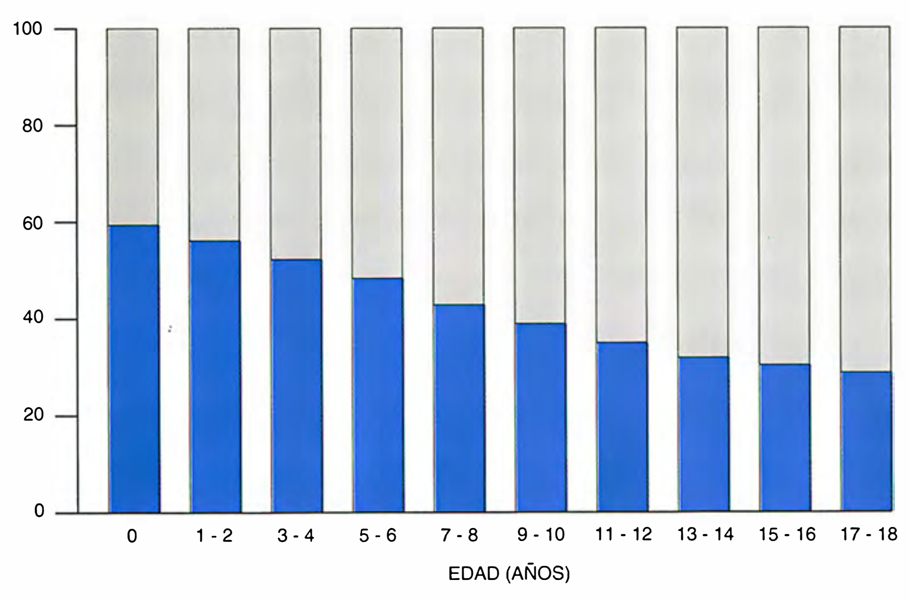
Hemos asistido recientemente a cierta confusión en el cálculo del tamaño cerebral relativo de los autralopitecinos gráciles (*Australopithecus africanus* y *Australopithecus afarensis*). La raíz de esa confusión yace en que algunos autores consideran hembras a los especímenes pequeños (los mejor conocidos), y machos a los especímenes fragmentarios de individuos mucho mayores encontrados en los mismos yacimientos fósiles. Para otros autores, sin embargo, respaldados por pruebas sólidas, los individuos mayores pertenecen a una especie distinta. La hipótesis que defiende una sola especie comporta una consecuencia improbable: lleva a un valor del peso corporal medio de 50 kg o más, peso situado en el intervalo de los monos antropomorfos modernos. Y, por tanto, los australopitecinos gráciles serían indistinguibles de los monos antropomorfos, incluso en términos de tamaño cerebral *relativo*. Esto ha dado pie a que reverdezca esa idea según la cual la expansión del cerebro empezó con el género *Homo*.

Una idea equivocada. En efecto, todos los tamaños cerebrales publicados de los autralopitecinos gráciles se han basado en individuos de cuerpo pequeño, que, según la hipótesis de la especie única, serían hembras. Podemos, pues, esquivar fácilmente el





3. EL MONO ARAÑA *Ateles geoffroyi* (*a*), muy frugívoro, tiene un peso corporal de unos 7,5 kg y un peso cerebral medio de 110 g. El mono aullador, *Alouatta palliata* (*b*), que come cantidades aproximadamente iguales de frutos y de hojas (como en esta higuera), tiene un peso corporal similar de unos 6,6 kg, pero un peso cerebral promedio de sólo 55 g. Se ha sugerido que el mono araña "necesita" un cerebro mayor porque, en la pluviselva tropical, los frutos idóneos son más difíciles de encontrar que las hojas. (Fotografías tomadas por el autor en la isla Barro Colorado, Panamá.)



4. PORCENTAJE DE CONSUMO energético del cuerpo que se reserva para el tejido cerebral (*área azul*) a diferentes edades en el ser humano. En el momento del nacimiento, el cerebro consume cerca del 60 % de la energía corporal, para decaer hasta algo más del 20 % en los adultos.

tema espinoso de la identificación de las especies: los valores de *Australopithecus africanus* pueden compararse exclusivamente con los de las *hembras* de los monos antropomorfos. Al hacerlo, sigue resultando que el tamaño cerebral relativo de *Australopithecus africanus* era un 50 % mayor que el tamaño medio de los grandes primates modernos. En definitiva, no existe fundamento para vincular la aparición de útiles de piedra con el aumento inicial del volumen relativo del cerebro humano.

Las explicaciones sobre la razón de un mayor cerebro en los humanos modernos adquieren más verosimilitud cuando se basan en comparaciones generales entre primates. Las hipótesis pueden descansar entonces en principios generales, y no en argumentos especiales para los seres humanos que resultarían difíciles de probar. Para los primates en su conjunto suele darse por sentado que el tamaño cerebral relativo guarda cierta relación con su "inteligencia". A la hora de desentrañar esa conexión se acude a dos contextos principales: comportamiento forrajero y complejidad social. (Se ha sugerido incluso que la complejidad de las relaciones sociales, por sí sola, induciría el aumento evolutivo del volumen del cerebro humano, siendo el lenguaje un factor determinante.)

La idea de que el tamaño relativo del cerebro, entre primates, pudiera estar directamente vinculado con la búsqueda de alimento, parte de la observación de que las especies que se alimentan de hojas suelen mostrar menor volumen cerebral relativo que las especies frugívoras. Entre los monos del Viejo Mundo, por ejemplo, los monos-hoja (subfamilia Colobinae) tienen un tamaño cerebral relativo persistentemente menor que los guenons y sus parientes (subfamilia Cercopithecinae). Entre los del Nuevo Mundo se repite un patrón similar; sean por caso los monos araña, que se alimentan sobre todo de frutos, y los monos aulladores, que incluyen una gran proporción de hojas en su dieta (*figura 3*). En este segundo ejemplo podemos establecer una comparación directa del tamaño cerebral porque los monos araña y los aulladores alcanzan un peso corporal bastante similar (7,5 kg y 6,6 kg respectivamente). Pese a la pequeña diferencia de tamaño corporal, el cerebro de los monos araña dobla el de los aulladores. Partiendo de este dato, algunos autores han sostenido que los frugívoros "necesitan" un mayor cerebro que los comedores de hojas porque la búsqueda de frutos adecuados en la selva constituye una tarea más exigente que la búsqueda de hojas, y requiere, pues, una mayor capacidad de procesamiento nervioso central. A primera vista, tal explicación parece convincente.

Por otro lado, se ha sugerido también que el gran tamaño cerebral relativo de los primates está ligado no al comportamiento forrajero, sino a la complejidad social. En varios estudios se ha demostrado una posible relación entre tamaño del grupo social y tamaño relativo del cerebro íntegro, o de determinadas partes del mismo. De nuevo, el razonamiento parece impecable: los primates que viven en grupos sociales numerosos, y participan por ende en una red de interacciones más compleja, "necesitan" cerebros mayores que los que viven en grupos sociales más reducidos.

En este contexto, sin embargo, resulta más difícil medir el comportamiento implicado. En el caso de la dieta, podemos determinar la cantidad de frutos y hojas comidas; y basta con suponer que en la selva cuesta más hallar frutos que cortar hojas. (Una suposición un tanto ingenua. Los estudios de campo han demostrado que los primates comedores de hojas se muestran muy exigentes en la elección de las hojas, y no es en absoluto obvio que resulte más fácil encontrar en la selva las hojas adecuadas que los frutos.) Con respecto a los sistemas sociales, tampoco es inmediata la complejidad de las interacciones. Una vez más, los monos aulladores, de cerebro pequeño, y los araña, de cerebro grande, nos ofrecen un ejemplo ilustrativo. Dichos aulladores suelen vivir en grupos sociales bien definidos, de entre 6 y 16 individuos (según la población estudiada). Los monos araña, por contra, viven en sociedades con un sistema de fisión-fusión; es decir, se les ve alimentándose en grupúsculos de tres individuos, subunidades a su vez de grupos de unos 20 individuos. De estas dos especies, ¿cuál se enfrenta a interacciones sociales más complejas?

Conviene aclarar antes una importante cuestión criteriológica: el que dos características muestren correlación de algún tipo no significa necesariamente que haya una conexión causal entre ellas. Si un factor básico, A, determina dos rasgos independientes, B y C, encontraremos, una correlación entre B y C, aunque uno y otro presenten su propia relación de dependencia con A. Por ejemplo, los niños con manos grandes tienden a tener también cerebros grandes; ambas características vienen, sin embargo, determinadas en buena medida por el tamaño corporal general. Si el tamaño cerebral relativo de los primates está relacionado con la dieta, el tamaño del grupo y otros rasgos (complejidad locomotriz y estrategias de cría, por ejemplo), ¿cuál de esos factores "explica" (suponiendo que lo haga alguno) la evolución del cerebro? Hemos de ir más allá de una correlación somera y establecer una conexión causal real. Se debe poner especial cuidado para excluir los efectos colaterales que, por sí mismos, no son responsables directos de un mayor volumen del cerebro.

Podemos partir de un planteamiento diferente a la hora de abordar la cuestión de la evolución del tamaño cerebral. No preguntemos por qué esta o aquella especie "necesita" un cerebro grande; preguntemos por qué puede "permitírselo". En otras palabras, conozcamos de qué modo las especies con cerebros grandes obtienen los recursos necesarios para producirlos y manejarlos. El tejido cerebral es costoso: su desarrollo entraña un importante consumo de recursos y su funcionamiento normal gasta una notable cantidad de energía. Así, aunque el cerebro humano adulto representa sólo un 2 % del peso corporal, consume más del 20 % de los recursos energéticos del organismo. Situación que es incluso más pronunciada en el recién nacido; en el alumbramiento, el cerebro representa el 10 % del peso y consume alrededor del 60 % de la energía del lactante (*figura 4*).

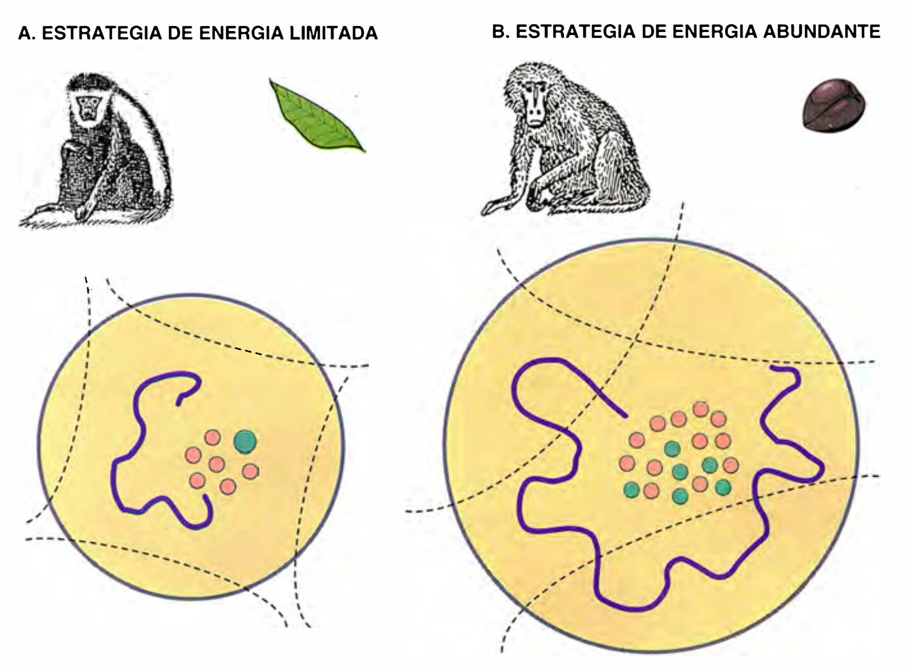
El cerebro presenta una singular peculiaridad con respecto a la mayoría de los órganos. Se desarrolla bastante pronto y representa, por tanto, un elevado porcentaje de peso corporal en las primeras etapas de la vida. A este propósito, la importante fracción de peso cerebral (12 %) de los primates neonatos que se mencionó antes adquiere un relieve adicional: obliga a la madre a soportar una carga superior, pues a ella le corresponde suministrar la energía en forma de leche. Incluso en los homínidos más primitivos, como *Australopithecus africanus*, los lactantes (según demuestra el famoso cráneo de Taung (*figura 5*) habrían necesitado un aporte de energía materna muy elevado.

Puesto que los recursos energéticos y el tamaño cerebral aumentan en la misma proporción con respecto al tamaño corporal, debe de existir entre los dos primeros alguna relación. En fisiología comparada se conoce desde hace tiempo la "ley de Kleiber". Nos dice ésta que la tasa metabólica basal (parámetro que designa la cadencia con que el animal en reposo usa la energía extraída de la alimentación) equivale a la multiplicación de una constante por el peso corporal del individuo, elevado a 0,75; por ser el exponente inferior a la unidad, se desprende que, si bien los grandes mamíferos necesitan más energía, los micromamíferos presentan un metabolismo basal superior por peso. Hace unos 15 años se demostró que el tamaño cerebral de los mamíferos sigue también esa misma relación escalar de 3/4 respecto al tamaño corporal.

Sin embargo, la conexión sugerida por dicha semejanza debe ser indirecta, pues no existe estricta corres-



5. CRANEO DE TAUNG de un niño de *Australopithecus africanus*, que probablemente tenía poco más de 3 años cuando murió. La caja craneana natural encierra un volumen de 405 cc, lo que representa ya el 92 % del tamaño cerebral adulto medio. El descubrimiento de este cráneo en 1924 demostró que la modificación de los dientes, la adquisición de una postura corporal erguida (indicada por la posición del foramen magnum, detrás del cráneo) y el aumento de tamaño del cerebro ya estaban presentes en los homínidos primitivos (Fotografía tomada por el autor).



6. LOS PRIMATES que se alimentan de hojas, como los miembros del grupo de monos colobos (subfamilia Colobinae), tienen en general tasas metabólicas basales (con respecto al tamaño corporal) más bajas que sus parientes frugívoros y puede decirse que muestran una "estrategia de energía limitada". Al disponer de menos energía, suelen mostrar una actividad locomotriz más limitada (como refleja las distancias más cortas en su salida forrajera diaria) y área de búsqueda de alimento menor. La limitación energética tenderá también a restringir el tamaño del grupo, porque los grupos grandes exigen más alimento y, por consiguiente, un área de forrajeo mayor. Sus parientes frugívoros, como cierto grupo de los cercopitecinos, despliegan una "estrategia rica en energía", reflejada en distancias de forrajeo diario más largo, áreas de búsqueda de alimentación más extensas y grupos sociales mayores.

pondencia entre metabolismo basal y tamaño cerebral en adultos. Tan sólo hay una semejanza general en el modelo global de aumento de escala con respecto al tamaño corporal. Esto me llevó a proponer la siguiente hipótesis: puesto que los cerebros son órganos útiles, la selección privilegiará el tamaño cerebral máximo permitido por los recursos energéticos disponibles de cualquier mamífero. El tamaño alcanzado por el cerebro depende, en esencia, del aporte materno durante el desarrollo fetal y la lactación, ya que, cuando se produce el destete, ha tenido lugar la mayor parte del crecimiento del volumen cerebral. Por consiguiente, es el recambio de energía de la madre lo que limita fundamentalmente el tamaño cerebral final conseguido por su descendencia. Así pues, hay una conexión indirecta entre el recambio energético materno y el tamaño cerebral adulto alcanzado por sus crías. La relación podría variar porque los recursos dedicados por una madre a un solo descendiente divergen en las distintas especies. Entre otras cosas, con esta hipótesis se explica que el tamaño cerebral haya ido aumentando en todas las líneas de mamíferos con el tiempo, aunque a diferentes ritmos. Sólo sería necesaria una ventaja selectiva general del mayor tamaño cerebral combinada con aumentos graduales del rendimiento metabólico.

Si volvemos ahora a las correlaciones observadas entre tamaño cerebral y aspectos específicos del comportamiento, podemos ofrecer una explicación alternativa. Como regla general, los primates comedores de hojas tienen tasas metabólicas basales inferiores (en relación con su peso corporal) a las de los primates frugívoros; ese fenómeno refleja probablemente que cuesta más digerir las hojas, que, además, suelen poseer una densidad de energía menor. Al disponer de menos energía, los primates que comen hojas muestran también menos actividad locomotriz (evidenciada en recorridos diarios más cortos) y defienden territorios de habitación menores. La limitación de la disponibilidad energética tenderá a mantener pequeño el tamaño del grupo; las agrupaciones mayores requieren más alimento y, por tanto, a igualdad de condiciones en todos los aspectos restantes, un forrajeo más largo (*figura 6*).

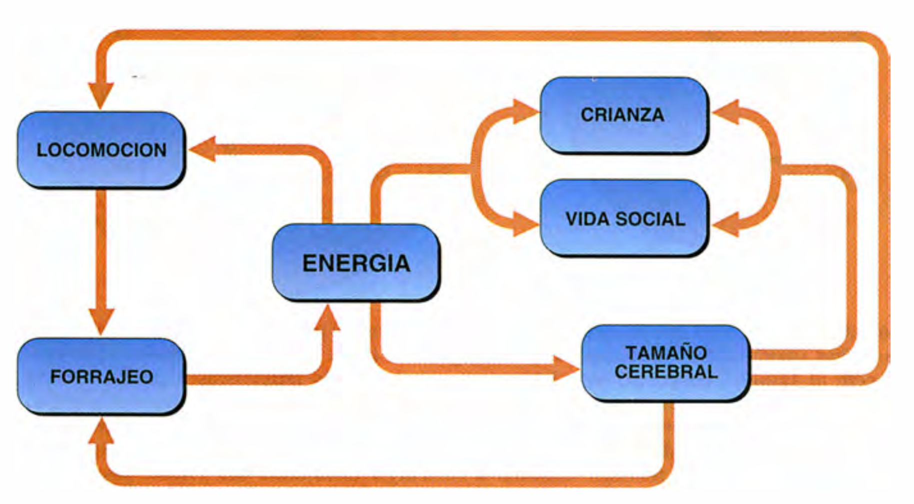
La hipótesis de la energía materna ofrece una explicación alternativa del tamaño moderado del cerebro de los primates que se alimentan de hojas. Las correlaciones entre volumen cerebral y dieta, tamaño del grupo social y otros factores (locomoción y estrategias reproductoras, por ejemplo) pueden considerarse reflejos indirectos del papel fundamental desempeñado por la disponibilidad de energía (*figura 7*). No negamos, obviamente, la probabilidad de que los individuos de cerebro grande participen en un comportamiento forrajero más complejo y muestren un comportamiento social más elaborado, pero estos factores no tienen por qué ser los determinantes selectivos que favorecieran, en el curso de la evolución, un aumento del tamaño cerebral.

Abundando en lo mismo, es indudable que, a lo largo de la evolución humana, nuestros mayores cerebros posibilitaron unas pautas de cada vez más complejas: fabricación de útiles e implicación en interacciones sociales (lenguaje incluido). Pero cabe admitir que tales actividades no fueran específicamente responsables de que la selección fomentase un cerebro de mayor tamaño.

En cambio, quizá deberíamos centrar más nuestra atención en la cuestión del coste que supone el incremento del tamaño cerebral. El tamaño del cerebro ha ido aumentando progresivamente durante los cuatro estadios representativos de la evolución humana: 440 centímetros cúbicos de *Australopithecus africanus*, 640 cc de *Homo habilis*, 940 cc de *Homo erectus* y 1230 cc de *Homo sapiens*. Este aumento del tamaño cerebral, relativamente rápido, debe haber exigido un avance creciente en la provisión de energía, lo que requería nuevos progresos en locomoción y comportamiento alimentario. A este respecto, nos es dado ya definir una conexión entre los tres principales hitos biológicos conseguidos por los seres humanos, cuya pista podemos seguir a través del registro fósil: locomoción bípeda, remodelación de la dentición y un cerebro muy grande.

Las adaptaciones locomotoras están directamente asociadas con el comportamiento forrajero, los dientes intervienen también directamente en el procesamiento del alimento y la energía obtenida de éste es necesaria para el desarrollo y el funcionamiento de un cerebro de mayor tamaño. Parece, por tanto, claro que un factor principal de la evolución humana debe haber sido el aumento progresivo de la capacidad para encontrar y explotar recursos alimentarios de alta energía.

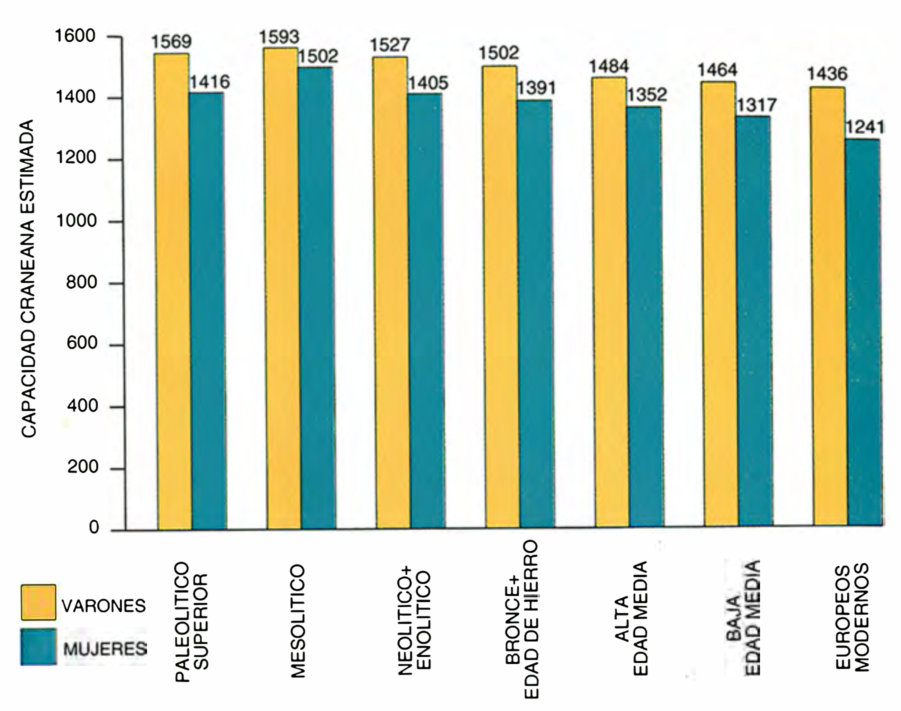
Llegados a este punto, podemos retomar las comparaciones generales de los primates para establecer paralelismos de interés. Entre los primates no humanos, el mayor tamaño cerebral relativo no corresponde a un gran primate, ni siquiera a un simio del Viejo Mundo. Esta distinción le pertenece al mono capuchino (especie de *Cebus*), uno de los primates del Nuevo Mundo. Los monos capuchinos se destacan por su "inteligencia" manifiesta, y parece verosímil que en esto se dé una conexión general con el hecho de que su tamaño cerebral relativo sea aproximadamente la mitad del medido en humanos. Sin embargo, los monos capuchinos no viven en grupos sociales extensos grandes, ni su consumo de frutos supera al de muchas especies de monos de menor cerebro. No obstante, exhiben un comportamiento forrajero muy complejo que se concentra en una dieta rica en energía: larvas de insectos, nueces y huevos de aves, entre otros recursos. Los monos capuchinos son los únicos primates que comparten con los humanos un sistema digestivo adaptado al procesamiento rápido del alimento de alta energía.



7. CORRELACIONES del tamaño cerebral con la dieta, tamaño del grupo social, locomoción y reproducción. Dichas correlaciones evidencian un sistema de relaciones de retroalimentación en las que la disponibilidad de energía desempeña un papel principal.

Un segundo ejemplo instructivo lo proporciona el ayeaye (*Daubentonia*). Por regla general, los primates prosimios (lemúridos, loris y tarseros) tienen cerebros claramente más pequeños que el resto de los primates, pero el lémur ayeaye constituye una importante excepción. El cerebro del ayeaye tiene, con mucho, el mayor tamaño relativo encontrado entre los prosimios, con un valor próximo a la media de los primates no prosimios. Pero posee hábitos solitarios, de modo que la complejidad social no puede explicar su cerebro sobresaliente entre los prosimios. Además, aunque el ayeaye come frutos, hay varios lémures de cerebro pequeño que comparten, por lo menos, una dieta frugívora. El tamaño relativamente grande del cerebro del ayeaye quizá pueda atribuirse a su dieta, muy rica en energía. De hecho, usan sus especiales adaptaciones, a saber una dentición semejante a la de los roedores y un dedo medio a modo de calador, para extraer las larvas ricas en energía alojadas en la madera de los troncos. Estos dos primates proporcionan pruebas de que la principal asociación del tamaño cerebral se establece con el alimento de alto contenido energético, y no con la complejidad social o la búsqueda de frutos. Debe recordarse también que los prosimios que se alimentan de frutos tienen un cerebro menor que los monos que comen hojas. Según la hipótesis del forrajeo, los prosimios frugívoros "necesitarían" cerebros grandes para encontrar sus frutos en la selva.

La conexión aquí postulada entre suministro de energía y volumen cerebral ayuda también a explicar una serie de hallazgos enigmáticos concernientes al tamaño cerebral de los humanos modernos. En primer lugar, no hay correlación convincente entre tamaño del cerebro y resultados de las pruebas de cociente intelectual. En algunos estudios se han publicado correlaciones débiles, pero, una vez descartados los efectos ejercidos por el entorno económico y del tamaño corporal, se desvanece la pretendida correlación.



8. DESCENSO PROGRESIVO del tamaño cerebral medio de los europeos desde hace unos 20.000 años. Empezó durante el Paleolítico superior.

Si la evolución del tamaño del cerebro estuviera ligada a una capacidad de comportamiento específica, cabría en principio esperar una vinculación nítida de una con otra en las poblaciones humanas modernas. Cualquier hipótesis de acuerdo con la cual la evolución del volumen cerebral dependiera de determinada capacidad debería poderse someter a contrastación con la variabilidad de los humanos modernos (la materia prima sobre la que actuaría la selección). Podría aducirse que las pruebas de CI no miden la habilidad conductual en cuestión, pero el peso de la prueba recae sobre los que proponen una selección específica del tamaño cerebral. Lisa y llanamente, no hay pruebas de que en los humanos exista una correlación entre grado de "inteligencia" y tamaño cerebral.

Quienes, a pesar de todo, defendieran semejante conexión habrían de resolver una problema más espinoso todavía. Se sabe, desde hace tiempo, que los neandertales (*Homo neanderthalensis*) tenían un tamaño cerebral medio mayor que los humanos modernos, lo que ha constituido siempre un enigma. Por otro lado, cada vez hay más pruebas de que el cerebro de los componentes de nuestra propia especie *Homo sapiens* era antes mayor que ahora. Todo indica que se ha ido produciendo una reducción estable del tamaño cerebral humano (sin disminución concomitante del tamaño corporal) durante los últimos 20.000 años, aproximadamente (*figura 8*). Por tanto, el tamaño del cerebro humano ha experimentado un descenso progresivo durante el mismo período en que se han producido los avances más notorios de la cultura humana. ¡No puede decirse, en absoluto, que esta reducción del tamaño cerebral humano haya ido asociada a una reducción de la complejidad en el uso de herramientas o en las interacciones sociales! Parece mucho más probable que haya habido una desviación de las relaciones energéticas subyacentes, que reflejan quizás una disminución gradual de la inversión materna.

Así pues, al hablar de capacidad cerebral humana, observamos que lo realmente crucial para el volumen del cerebro reside en el suministro de la energía que necesita su desarrollo y funcionamiento. Aunque hay, obviamente, alguna conexión general entre tamaño cerebral y complejidad de comportamiento, según cabe inferir del hecho de que el cerebro humano moderno sea unas tres veces mayor que el de cualquier mono antropomorfo, quizá no exista una relación directa entre tamaño cerebral y capacidades conductuales individuales. De lo contrario resultaría difícil explicar por qué los cambios de mayor trascendencia para la sociedad humana han ido acompañados de un descenso progresivo de nuestro tamaño cerebral.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

PRIMATE ORIGINS AND EVOLUTION: A PHYLOGENETIC RECONSTRUCTION, por R. D. Martin. *Princeton University Press*; Princeton, 1990.

THE CAMBRIDGE ENCYCLOPEDIA OF HUMAN EVOLUTION. Dirigida por Steve Jones, R. D. Martin y David Pilbeam. *Cambridge University Press*; Cambridge, 1992.



Aparición de la inteligencia

El lenguaje, la capacidad de anticipación, la destreza para la música y otras muestras de inteligencia están relacionados entre sí a través de cierta configuración subyacente que refuerza los movimientos rápidos

William H. Calvin

Para la mayoría de observadores, la esencia de la inteligencia reside en la lucidez, en la versatilidad para resolver problemas nuevos. Bertrand Russell apuntó con ironía: "Los animales estudiados por los americanos corretean de acá para allá con increíble prisa y energía hasta que acaban dando, qué casualidad, el resultado que se deseaba. Los animales observados por los alemanes permanecen quietos, pensativos, y, finalmente, sacan la solución del interior de sus conciencias." Además de criticar los usos científicos de 1927, la cita de Russell ilustra la falsedad de la dicotomía que se levanta entre un proceder estocástico por ensayo y error (sin aparente relación con la conducta inteligente) y un diseño perspicaz.

Suele afirmarse también que de la esencia de la inteligencia es la previsión. Jean Piaget insistía en que la inteligencia era el complicado rodeo que damos cuando no sabemos qué camino tomar. Me siento más a gusto con el planteamiento de Horace Barlow, neurobiólogo de Cambridge, para quien la inteligencia es todo aquello que nos permite idear una conjetura que descubra un nuevo orden subyacente. Este enfoque cubre un campo amplísimo: desde hallar la solución de un problema o la lógica de un argumento hasta dar con una analogía apropiada, una armonía agradable o una réplica ingeniosa, pasando por colegir lo que probablemente sucederá. Predecimos lo que ha de venir a continuación, aun cuando estemos oyendo pasivamente un relato o una melodía. Y así, nos despierta de nuestro letargo el chiste despanzurrado cuya secuencia conocíamos o la parodia de una fuga de Bach que nos es familiar: en el subconsciente predecíamos una evolución que se ha visto rota por la pifia.

Nunca habrá acuerdo universal sobre una definición de la inteligencia, porque es un vocablo abierto, lo mismo que conciencia. La inteligencia y la conciencia tienen que ver con lo más elevado de nuestra vida mental, pero frecuentemente se las confunde con otros procesos más elementales, como los que ponemos en juego para reconocer a un amigo o para atarnos los cordones de los zapatos. Por descontado que esos simples mecanismos nerviosos son, probablemente, los fundamentos a partir de los cuales evolucionaron nuestras capacidades para manejar la lógica y la metáfora.

Mas, ¿cómo ocurrió tal cosa? A esta pregunta deberán dar respuesta la teoría de la evolución y la neurofisiología, que podrían incluso socorrernos a la hora de imaginar vías de evolución para una inteligencia artificial o una inteligencia exótica. ¿Surgió nuestra inteligencia por tener nosotros más de algo que compartimos con otros animales? La parte del cerebro implicada en la producción de asociaciones nuevas es la corteza cerebral, de dos milímetros de espesor. La nuestra, que es muy rugosa, si la extendiéramos ocuparía la superficie de cuatro holandesas. La corteza de un chimpancé ocuparía, desplegada, una holandesa; la corteza de un mico, una tarjeta postal, y la de una rata un sello de correos.

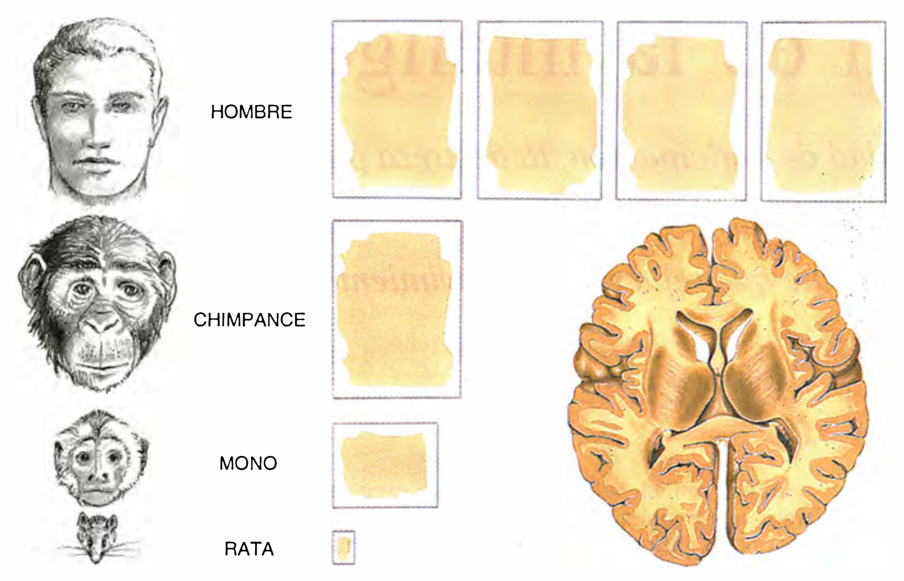
Pero la explicación puramente cuantitativa parece incompleta. Sostendré que nuestra inteligencia surgió en virtud del refinamiento de alguna especialización del cerebro, tal como la que se da en el caso del lenguaje. La especialización posibilitaría un salto cuántico en rapidez de comprensión y en previsión, a lo largo de la evolución humana desde el tronco primate. Si, como creo, esta especialización supone la existencia de una configuración física común para el lenguaje, la planificación de los movimientos de las manos, la música y la danza, entonces encierra mayor potencia explicativa.

La persona muy inteligente se suele distinguir por su rapidez y capacidad para combinar diversas ideas a la vez. Los dos factores que más influyen en el cociente de inteligencia (CI) son el número de preguntas respondidas por unidad de tiempo y el debido ordenamiento de media docena de imágenes mentales —como las que entran en el juego de las analogías: A es a B lo que C es a (D, E o F).

La versatilidad es otra característica de la inteligencia. La mayoría de los animales se desenvuelve dentro de un intervalo muy estrecho de especialización, por ejemplo en asuntos de dieta: el gorila de montaña consume a diario 22 kilogramos de hojas verdes. Por contra, el chimpancé varía bastante de dieta; se alimenta de frutas, termitas, hojas y, si la suerte acompaña, de pequeños simios y algún cochinillo. Los omnívoros cuentan con una gama más amplia de comportamientos a partir de un patrón básico porque sus antepasados hubieron de acudir a recursos alimentarios muy diversos. Necesitaron también más pautas sensoriales —imágenes mentales de comida y predadores concurrentes. Su conducta es un resultado del

1. LOS CHIMPANCES PIGMEOS tienen notable aptitud para el lenguaje simple y cierta capacidad para el uso de herramientas; por ejemplo, emplean como martillos algunas piedras. Pero comparadas con las de los humanos, las habilidades de estos animales son muy rudimentarias. La inteligencia humana evolucionó tal vez mediante el aumento de una importante configuración central que participa en la planificación de los movimientos rápidos de manos y boca.

WILLIAM H. CALVIN trabaja en la facultad de medicina de la Universidad de Washington. Tras estudiar física, se pasó al campo de la neurología, que cursó en el Instituto de Tecnología de Massachusetts y en Harvard.



2. CORTEZA CEREBRAL, región de la superficie delimitada por surcos profundos y retorcidos; guarda una estrecha vinculación con la inteligencia (*arriba a la derecha*). Si la alisáramos, la corteza cerebral humana cubriría cuatro holandesas; la de un chimpancé, una; la de un mono, la superficie de una tarjeta postal, y la de una rata un sello de correos.

ajuste entre estas pautas sensoriales y los movimientos de respuesta.

A veces, los animales ensayan, durante el juego, una nueva combinación de imagen y movimiento; y la aplican luego. Muchos animales sólo juegan en su fase juvenil. El estado adulto es cosa seria, pues han de alimentar a las crías. El disponer de un período juvenil largo, como ocurre en primates y humanos, favorece, sin duda, la inteligencia. Una vida larga promueve ulteriormente la versatilidad, proporcionando más oportunidades de descubrir nuevos comportamientos.

La vida social permite imitar los descubrimientos obtenidos por unos y otros; expertos nipones han observado que un grupo de monos copiaba las técnicas de una inventiva hembra para limpiar de arena la comida. Además, la vida en sociedad está llena de problemas interpersonales por resolver, así los creados por la ley del más fuerte, que rebasan con mucho los desafíos habituales que plantean la supervivencia y la reproducción.

Pero la versatilidad no siempre es una virtud, ni poseerla en mayor grado una ventaja segura. Cuando en Uganda llegan los chimpancés a un bosque de árboles frutales, suelen descubrir que los monos locales están acabando muy deprisa con las ramas cargadas. Los chimpancés habrán entonces de contentarse con devorar termitas o cazar algún mono; de cualquier modo, verán mermada su población por dicha competencia, pese a gozar de un cerebro cuyo tamaño dobla el de sus rivales especialistas.

El que la versatilidad resulte o no ventajosa depende de las escalas temporales. Los paleoclimatólogos saben que muchas partes de la Tierra sufren cambios de clima repentinos, de inicio breve (una década de sequía por ejemplo) y permanencia de siglos. Un trastorno climático que eliminase los árboles frutales resultaría desastroso para muchas especies de monos, pero sería también un golpe para los animales omnívoros, si bien éstos podrían arreglárselas con otros alimentos e incluso disfrutar de un gran auge de población cuando se terminase la comida crujiente y quedasen pocos de sus competidores.

Aunque Africa se iba enfriando y secando al asomar la postura erecta, hace cuatro millones de años, el tamaño del cerebro no cambió mucho. La expansión del cerebro de los homínidos que lo multiplicaría por cuatro no comenzó hasta el inicio de las glaciaciones, hace 2,5 millones de años. Los testigos extraídos de los hielos de Groenlandia muestran que, a los ritmos de avance y retirada del hielo, pausados, se les superpusieron bruscos enfriamientos episódicos. En pocas décadas desaparecerían selvas enteras a causa de los drásticos descensos de la temperatura y la disminución de las lluvias. Algunos siglos después volverían a caer, también de repente, lluvias templadas.

La evolución de adaptaciones anatómicas en los homínidos no pudo ir a la par con estos bruscos cambios de clima, que ocurrirían durante la vida de cada individuo. Sin embargo, esas fluctuaciones del medio podrían haber contribuido a la acumulación de habilidades mentales que confiriesen mayor flexibilidad en la conducta.

Entre los añadidos que se produjeron durante la era de las glaciaciones estuvo la capacidad para el lenguaje humano. En la mayoría de nosotros el área cerebral de la que depende el lenguaje se halla encima del oído izquierdo. Los monos carecen de esta área lateral izquierda del lenguaje: sus vocalizaciones (y en los humanos los suspiros emotivos) emplean una zona de lenguaje más primitiva, situada junto al cuerpo calloso o haz de fibras que conecta los dos hemisferios cerebrales.

El lenguaje es lo más característico de la inteligencia humana: sin la sintaxis —disposición ordenada de ideas verbales—, seríamos poco más avispados que el chimpancé. Para hacernos alguna idea de una vida sin sintaxis, pensemos en el caso de Joseph, niño de 11 años sordo de nacimiento. Como no pudo oír ningún lenguaje hablado y nunca se le familiarizó con un lenguaje de signos, Joseph no aprendió sintaxis durante los críticos años de la infancia. Según le describió el neurólogo Oliver W. Sacks en *Seeing Voices:* “Joseph veía, distinguía, categorizaba, usaba; no tenía problemas con la categorización o la generalización *perceptuales*, pero, al parecer, no podía pasar mucho de ahí: le era imposible concebir ideas abstractas, reflexionar, jugar, hacer planes. Parecía completamente literal —incapaz de combinar imágenes, de hacer hipótesis, de concebir posibilidades, incapaz de entrar en el campo de la imaginación o de figurarse nada... Parecía, como el animal o el recién nacido, estar bloqueado en el presente, confinado a la percepción literal e inmediata, aunque sabedor de esto por una consciencia que ningún infante podría tener.”

Para entender por qué los humanos son tan inteligentes, hemos de conocer el proceso a través del cual nuestros antepasados remodelaron el repertorio simbólico de los primates y lo aumentaron inventando la sintaxis. En su estado salvaje los chimpancés emplean unas tres docenas de vocalizaciones distintas para comunicar unas tres docenas de significados diferentes. Pueden repetir un sonido para intensificar su significación, pero jamás juntarán tres sonidos para añadir a su vocabulario una voz nueva.

Los humanos empleamos también unas tres docenas de vocalizaciones, o fonemas. Pero sólo sus combinaciones poseen sentido: juntamos sonidos sin significación para hacer

palabras significativas. Nadie ha explicado aún de qué forma nuestros antepasados superaron la dificultad de reemplazar el sistema "un sonido/un significado" por un sistema combinatorio secuencial de fonemas sin significado, pero probablemente fue éste uno de los más importantes avances que tuvieron lugar durante la evolución de primate a hombre.

Además, el lenguaje humano utiliza secuencias de secuencias, como las que engarzan las palabras y las frases de esta misma proposición. A las formas elementales de conjuntar palabras, por ejemplo en las jergas dialectales, se las llama "protolenguaje". En un protolenguaje lo que transmite el mensaje es la asociación de las palabras, quizá con alguna ayuda del orden habitual de las mismas (tal como el orden sujeto-verbo-complemento en las sentencias declarativas).

Nuestros parientes más allegados del reino animal, el chimpancé común (*Pan troglodytes*) y el chimpancé pigmeo (*Pan paniscus*), alcanzan sorprendentes niveles de comprensión del lenguaje humano cuando son motivados por adiestradores hábiles. Kanzi, el pigmeo más experto, es capaz de interpretar frases que nunca oyó antes, como por ejemplo "Ve al despacho y trae la pelota roja", entendiéndolas más o menos como un niño de dos años y medio de edad. Ni Kanzi ni el niño construyen independientemente frases así, pero uno y otro pueden demostrar que las entienden. Con un año de experiencia en comprensión, el niño empieza a construir oraciones que empalman una frase con otra.

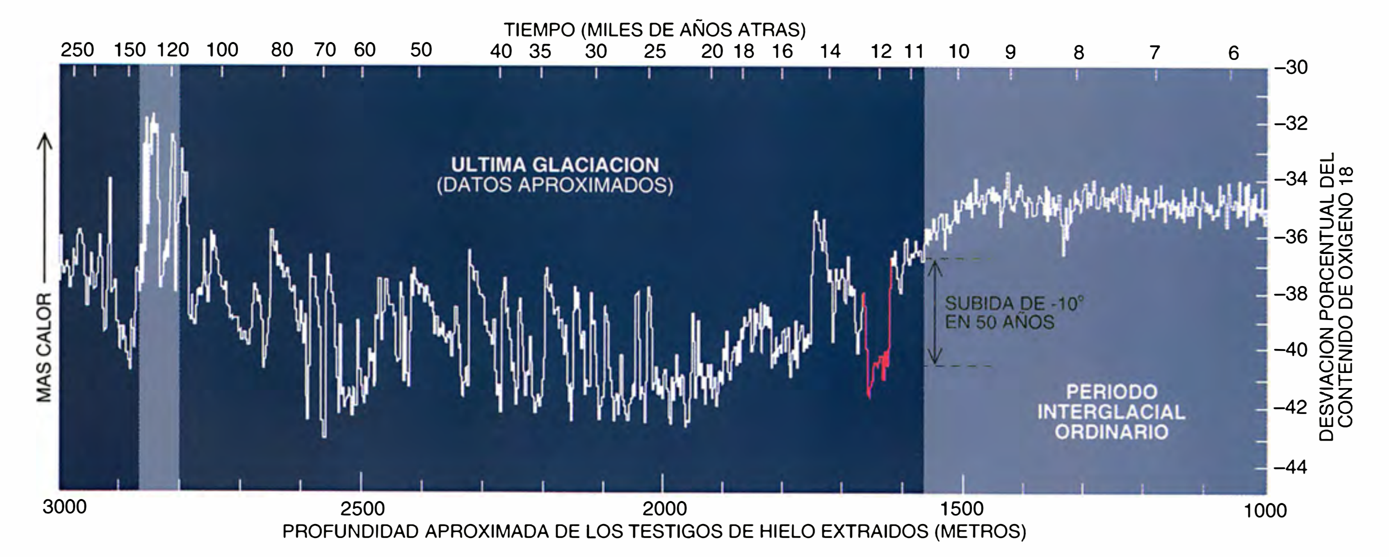
La sintaxis tiene ramificadas reglas de referencia que nos capacitan para comunicar rápidamente —a veces juntando menos de 100 sonidos— quién hizo qué a quién, dónde, cuándo, por qué y cómo lo hizo. Con una sola frase emitida revelamos si conocemos las reglas de la sintaxis lo bastante bien como para evitar las ambigüedades. Aun niños de corta inteligencia adquieren, al parecer sin esfuerzo, solamente escuchando, la sintaxis, aunque también niños inteligentes pero sordos, como Joseph, pueden carecer de ella.

Algo muy afín a la sintaxis verbal parece contribuir, asimismo, a la capacidad de hacer planes, otra propiedad de la inteligencia humana. Aparte de la preparación para la estación invernal, de carácter hormonal, los animales dan muy escasas muestras de que puedan hacer planes para más de unos pocos minutos después. Por ejemplo, algunos chimpancés utilizan largas varitas para sacar a las termitas de sus nidos. Sin embargo, según observó Jacob Bronowski, ninguno de los chimpancés termiteros "se pasa la tarde dando vueltas para arrancar y alisar una docena de varitas que le sean útiles al día siguiente".

Sí se observa cierto grado de planificación a corto plazo. Parece que está relacionada con un aumento decisivo de la inteligencia social. El engaño, visto en primates, raramente se da en los monos. Un chimpancé puede emitir un grito para anunciar que ha encontrado comida en un lugar y luego retroceder despacio dando un rodeo a través de la espesura hasta el sitio en que realmente halló algo que comer. Mientras los otros chimpancés sacuden los arbustos allí donde sonó el grito engañador, el embaucador come sin necesidad de compartir.

Lo más difícil de proyectar son las respuestas a situaciones únicas. Para idearlas bien hay que imaginarse múltiples planteamientos. La capacidad humana de hacer planes quizá se derive de nuestro talento para construir, mediante nexos sintácticos, estructuras conceptuales más largas que las frases sencillas.

Nuestra capacidad de hacer planes se desarrolla gradualmente a partir de los cuentos de la infancia y constituye un importante fundamento para las decisiones éticas; al imaginarnos el curso de una acción imaginamos sus efectos sobre los demás y decidimos si actuar o no. De este modo, la sintaxis eleva la inteligencia a un nuevo nivel. Tomando las estructuras mentales de la sintaxis para enjuiciar otras combinaciones de posibles acciones, podemos ampliar nuestra capacidad de hacer planes y nuestra inteligencia. Hasta cierto punto esto lo hacemos hablándonos silenciosamente a nosotros mismos, fraguando relatos de lo que podría ocurrir luego y aplicando por consiguiente reglas combinatorias, como las de la sintaxis, para estimar una situación futura como peligrosamente disparatada, meramente absurda, po-



3. CAMBIOS DE CLIMA BRUSCOS pudieron instar una mayor flexibilidad en la conducta de los antepasados de los humanos modernos. Durante la última edad del hielo, la temperatura media fue muy inferior a la de hoy, pero también estuvo sometida a grandes y repentinas fluctuaciones que a veces duraron siglos enteros. Por ejemplo, durante una oscilación climática (*línea roja*), la temperatura subió 10 grados, las lluvias aumentaron un 50 por ciento y disminuyó la violencia de las tormentas de arena, todo ello en el intervalo de unos pocos decenios. Los períodos fríos se iniciaron también de forma súbita. Los humanos primitivos debieron de necesitar mayores recursos intelectuales para sobrevivir a semejantes cambios. Este gráfico se basa en las investigaciones sobre testigos de hielo de Groenlandia realizadas por W. Dansgaard.

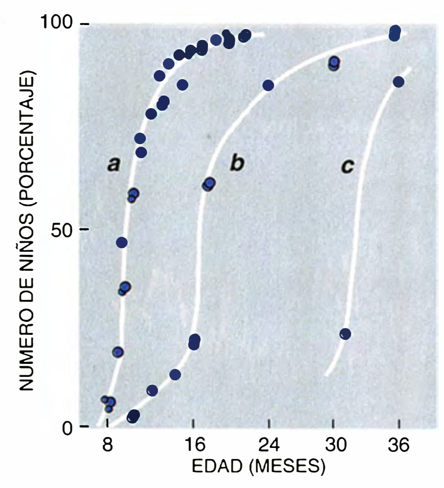


4. KANZI, un chimpancé pigmeo, se ha criado en la Universidad estatal de Georgia, en un ambiente de uso del lenguaje. Apuntando a símbolos que representan diversas palabras, Kanzi formula peticiones muy parecidas a las que hacen los niños de dos años. Su comprensión es la de un humano de 2,5 años de edad.

sible, probable o lógica. Pero nuestro pensamiento no se limita a los constructos lingüísticos. En realidad, podemos gritar "¡Eureka!" al advertir una feliz conexión de relaciones mentales y, sin embargo, sernos difícil expresarla verbalmente.

Son tan poderosos el lenguaje y la inteligencia que su aumento debía de venir favorecido por la evolución. Pero en el registro fósil abundan las mesetas. A menudo la evolución, más que "progresar" mediante adaptaciones, sigue rutas indirectas. Para explicar la amplitud de nuestras capacidades hemos de fijarnos en el perfeccionamiento de los dispositivos que comparten un núcleo común. Es difícil imaginarse entornos que a la persona dotada para la música le den ventaja evolutiva sobre la dura de oído, pero existen mecanismos cerebrales multifuncionales cuya mayor aplicación a una función crítica podría ayudar de paso a otras funciones.

Los humanos tenemos pasión por ensartar cosas: palabras en frases, notas en melodías, pasos en danzas, reglas en juegos. ¿No dependerá ello de algún dispositivo nuclear de nuestro cerebro, de una configuración o plantilla que sirva para el lenguaje, para contar historias, para hacer planes, para los juegos y para la ética? En tal caso, la selección natural en pro de alguno de estos talentos podría aumentar su compartido mecanismo nervioso, de suerte que una mayor facilidad sintáctica para formar frases incrementaría automáticamente la capacidad de hacer planes. A un resultado así es a lo que Charles Darwin llamaba cambio funcional en continuidad anatómica, distinguiéndolo de la adaptación gradual. La música y la danza son, a buen seguro, usos secundarios de la maquinaria nerviosa configurados por comportamientos secuenciales más expuestos a la selección natural, tales como el lenguaje.



5. LA ADQUISICION del lenguaje por los niños ocurre rápida y naturalmente mediante su trato con los adultos.

Aunque de entrada la idea parezca inverosímil, la planificación cerebral de los movimientos balísticos pudo haber promovido el lenguaje, la habilidad musical y la inteligencia. Los movimientos balísticos son acciones rapidísimas de los miembros que, una vez iniciadas, no se pueden modificar. Por ejemplo, la de golpear un clavo con un martillo. En los primates sólo se dan formas elementales de movimientos balísticos con los brazos, mientras que los humanos somos expertos en martillear, aporrear y lanzar. Estos movimientos forman parte integrante de la fabricación y utilización de los útiles y de las armas de caza: en algunos sitios la caza y la fabricación de utensilios serían complementos importantes en las estrategias de supervivencia de los homínidos.

Los movimientos balísticos requieren una planificación sorprendente. Los movimientos lentos dejan tiempo para improvisar: cuando nosotros alzamos una copa hacia los labios, si esa copa es más leve de lo supuesto, corregimos su trayectoria antes de que choque contra la nariz; no se necesita ningún plan para ello: iniciamos el movimiento siguiendo la dirección general recta y después lo corregi-

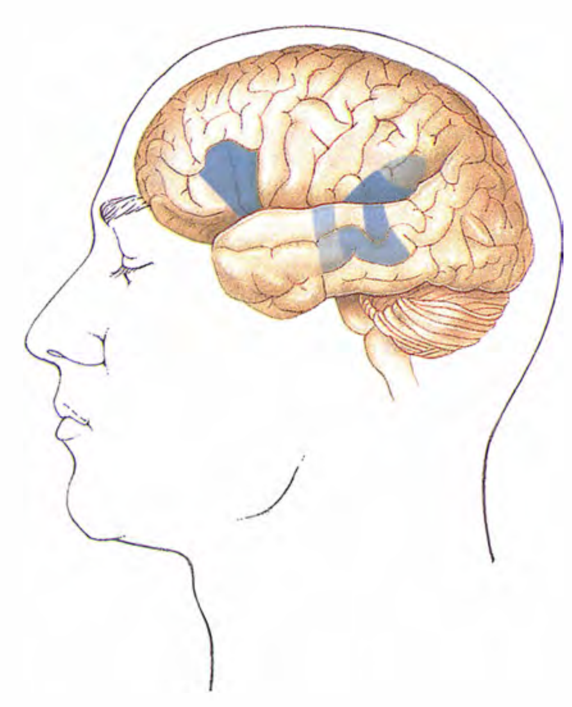
mos desviándolo, igual que se actúa con la trayectoria de un cohete lunar.

Para movimientos repentinos de los miembros, de un quinto de segundo de duración, las reacciones correctoras resultan bastante ineficaces, porque los tiempos de reacción son demasiado largos. El cerebro tiene que anticipar cada detalle del movimiento.

El martilleo requiere una exacta programación de la serie de actividades que han de llevar a cabo docenas de músculos. Mayor complejidad reviste el lanzamiento de un objeto con la ventana de lanzamiento: las veces que se puede disparar un proyectil de manera que dé en un blanco. Cuando se dobla la distancia a éste, esa posibilidad se divide por ocho; los cálculos estadísticos indican que la programación de un lanzamiento fiable requeriría en tal caso la actividad de 64 veces más de neuronas.

Si los movimientos de la boca descansaran en la misma plantilla secuenciadora que el movimiento de la mano al arrojar un proyectil, los avances operados en la capacidad lingüística redundarían en una mayor destreza manual, y a la inversa. El lanzamiento preciso de objetos posibilita el comer carne con regularidad y capacita, por tanto, para sobrevivir al invierno en una zona templada. El don del habla sería un beneficio incidental —un postre a elegir, por así decirlo, causado por la necesidad de unirse.

Pero, ¿existe un secuenciador común al movimiento y al lenguaje? Gran parte de la coordinación cerebral del movimiento ocurre a nivel subcortical, en los ganglios basales o cerebelo; las combinaciones de movimientos más originales tienden a depender, por contra, de la corteza premotora y prefrontal. Dos son las principales líneas de indicios que apuntan hacia una corteza especializada en secuenciar; ambas sugieren que el área lingüística lateral tiene mucho que ver con ello.



6. LA REGION ESPECIALIZADA en secuenciar, de la corteza cerebral izquierda, interviene en la audición del lenguaje hablado y en la producción de los movimientos de boca y rostro. Con el color gris-azulenco de diversa intensidad se indica la respectiva implicación de esas partes en dichas actividades, según los datos de George A. Ojemann.

Doreen Kimura ha hallado que a los pacientes hemipléjicos con problemas de lenguaje (afasia) derivados del deterioro de áreas laterales izquierdas del cerebro les cuesta también ejecutar con la mano y con el brazo movimientos a los que no están acostumbrados (apraxia). Estimulando eléctricamente los cerebros de pacientes a los que se había operado para curarles la epilepsia, George A. Ojemann ha demostrado que, en el centro de las áreas laterales izquierdas especializadas en el lenguaje, hay una zona que interviene en la audición de secuencias sonoras. Esta región perisilviana parece estar implicada en la producción de las secuencias motoras orofaciales, incluidas las no lingüísticas.

Estos descubrimientos revelan que algunas partes de la "corteza del lenguaje" desempeñan una función mucho más general de lo que se había sospechado. La corteza lingüística está relacionada con secuencias nuevas de varios tipos: con las sensaciones y los movimientos de manos y boca.

A la hora de inventar secuencias y producir comportamientos originales, el problema central estriba en la seguridad. Ni siquiera las meras inversiones del orden están exentas de riesgo. Nuestra capacidad para crear analogías y formar modelos nos da, con todo, cierta protección. Los humanos podemos propiciar futuros cursos de acción y eliminar eventuales sinrazones. La creatividad —meta suprema de la inteligencia y de la consciencia— requiere tantear con juegos mentales que conformen el resultado antes de actuar. ¿Qué clase de maquinaria mental se necesitaría para hacer algo así?

Allá por el año 1874, William James hablaba de procesos mentales que funcionarían a la manera darwiniana. Sugería la posibilidad de que las ideas "compitieran" en el cerebro y salieran vencedoras las mejores o "más eficaces". Lo mismo que en dos millones de años la evolución configuró un cerebro mejor, "un similar proceso darwinista" que funcionase en el interior de nuestro cerebro obtendría soluciones inteligentes a los problemas dentro de la escala temporal del pensamiento y de la acción.

Se ha demostrado que un proceso darwinista que funciona a escala

Una meditación sobre el pensamiento creativo

"Creo que el cerebro participa en un juego —unas zonas aportan los estímulos, otras las reacciones y así por demás. Sólo se es consciente de algo que, en el cerebro, actúa a la manera de compendiador o globalizador de los procesos en desarrollo, que probablemente conste de diversas partes en mutua interacción. Sólo puede comunicarse, de viva voz o por escrito, la cadena unidimensional de silogismos que constituye el pensamiento... Pero si quiero hacer algo nuevo u original, de nada valen entonces las cadenas de silogismos. De muchacho, pensaba que la rima de un poema tenía por misión descubrir lo velado, por la propia necesidad de hallar la palabra que rimase. Esa tarea fuerza a hacer nuevas asociaciones y casi garantiza el librarse de los encadenamientos rutinarios y de las inercias mentales. Llega a ser, valga la paradoja, una especie de mecanismo productor de originalidad automático... Y lo que llamamos talento o tal vez el genio mismo depende en gran medida de la habilidad con que se emplee bien la propia memoria para dar con las analogías... [que] son esenciales para el desarrollo de ideas nuevas." Stanislaw M. Ulam.

temporal intermedia, de días, rige la respuesta inmunitaria subsiguiente a una vacunación. Mediante una serie de generaciones celulares que dura varias semanas, el sistema inmunitario produce anticuerpos, que son las moléculas "más eficaces" contra los invasores. Abstrayendo de lo que se sabe sobre la evolución de las especies y sobre las respuestas inmunitarias los rasgos esenciales de un proceso darwinista, vemos que todo "mecanismo darwinista" ha de tener 6 propiedades.

Primera, tiene que operar siguiendo algún tipo de patrón; en genética están las secuencias de bases de ADN, pero los patrones de la actividad cerebral asociada a un pensamiento podrían identificarse. Segunda, de estos patrones se hacen copias. (La fidelidad en la copia define al patrón unidad.) Tercera, los patrones deben variar ocasionalmente, a través de mutaciones, por errores en la copia o por reorganización de sus partes. Cuarta, las variaciones del patrón han de competir por un espacio limitado. Quinta, en el relativo éxito reproductor de las variaciones influye el entorno; al resultado de ello es a lo que Darwin llamaba selección natural. Y, finalmente, la composición de la siguiente generación de patrones depende de qué variedades sobrevivan para ser copiadas. Los patrones de la generación siguiente serán variedades desplegadas en torno a las que tienen éxito. Muchas de estas variantes tendrán menos éxito que sus progenitoras, pero algunas tal vez tengan más.

El sexo y los cambios climáticos quizá no se cuenten entre los seis factores esenciales, pero añaden sazón y rapidez al proceso darwinista, funcione éste en milésimas de segundo o a lo largo de milenios. Adviértase que un factor "esencial" no es de por sí darwinista; por ejemplo, puede interpretarse como supervivencia selectiva el hecho de que una corriente de agua arrastre la arena y deje tras sí los guijarros.

¿Cómo aplicar estos principios a la evolución de una conjetura inteligente en el interior del cerebro? Los pensamientos son combinaciones de sensaciones y recuerdos —en cierto modo, son movimientos que aún no han sucedido (y acaso no sucedan nunca). Existen en el cerebro como patrones de actividad espaciotemporal, cada uno de los cuales representa un objeto, una acción o una abstracción. Estimo que un solo código cerebral contiene por lo menos unos cuantos centenares de neuronas corticales por milímetro, que permanecen inactivas o están excitadas.

La evocación de un recuerdo consiste en reconstituir un determinado patrón de actividad, según la hipótesis de la conjunción celular ideada por Donald O. Hebb. Los recuerdos a largo plazo son patrones congelados que esperan señales de resonancias próximas que los activen, algo así como si los baches de una carretera empantanada estuviesen esperando que pasara un coche para recrear un patrón espaciotemporal de saltos y tropiezos.

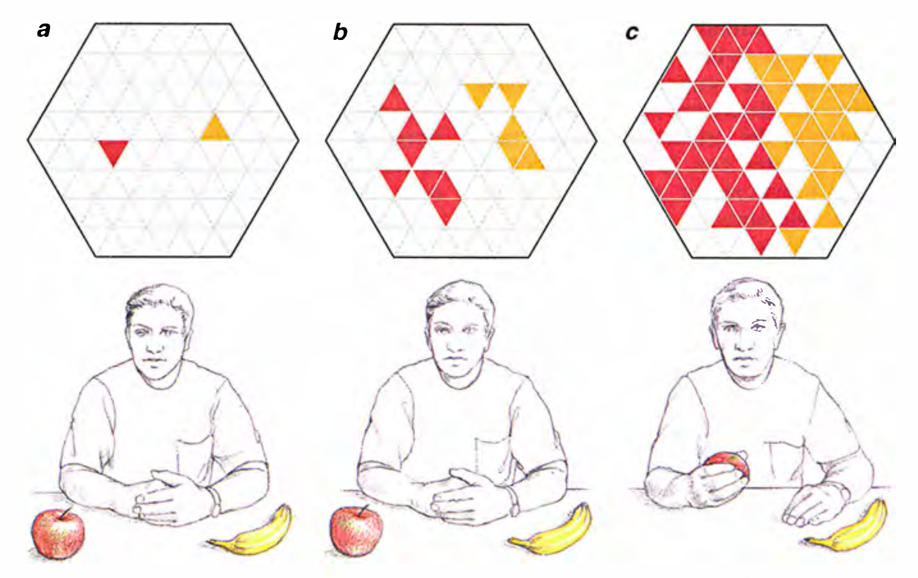
Algunos "baches cerebrales" son permanentes, mientras que otros son de corta duración. Los recuerdos a corto plazo no pasan de ser alteraciones transitorias de la intensidad de las conexiones sinápticas entre las neuronas, que dejó tras de sí el último patrón espaciotemporal para ocupar una parcela de la corteza; esa "potenciación a largo plazo" tal vez se esfume en cuestión de minutos. Desconocemos la naturaleza del paso del plazo breve al plazo largo en la formación del patrón, pero a la potenciación quizá le sigan alternancias estructurales; y ello de suerte tal, que las conexiones sinápticas entre neuronas se refuercen y se tornen permanentes, forjando el cableado del patrón de la actividad nerviosa intracerebral.

Un modelo darwinista de la mente sugiere que un recuerdo activado quizá compita con otros por el "espacio de trabajo" en la corteza. Las percepciones del actual entorno del pensador y los recuerdos de pasados entornos podrían sesgar esa competición y configurar un pensamiento emergente.

Un código cerebral activo se mueve de una parte a otra del cerebro creando una copia de sí mismo, a semejanza del proyector que reproduce en una pantalla distante lo escrito en película de acetato. La corteza cerebral tiene también circuitos para copiar patrones espaciotemporales en una región inmediatamente adyacente, a menos de un milímetro de distancia, aunque nuestras técnicas de formación de imágenes no alcanzan la resolución necesaria para observar la realización del proceso de copia. La repetida copia del minúsculo patrón podría colonizar una región, a la manera del crecimiento de un cristal o la iteración del dibujo en el papel de revestir paredes.

La imagen que emerge de estas consideraciones teóricas es la de un edredón polícromo, algunos de cuyos retales se van agrandando, a expensas de sus vecinos, a medida que un código se copia con más éxito que otro. Según lo entiendo yo, a la hora de escoger entre una manzana y un plátano del frutero, el código cerebral para "manzana" compite en clonaciones con el código para "plátano". Cuando uno de los dos códigos tenga bastantes copias activas para cerrarle al otro los circuitos de acción, tomaremos la fruta correspondiente.

Pero las codificaciones de la otra fruta no tienen por qué esfumarse:



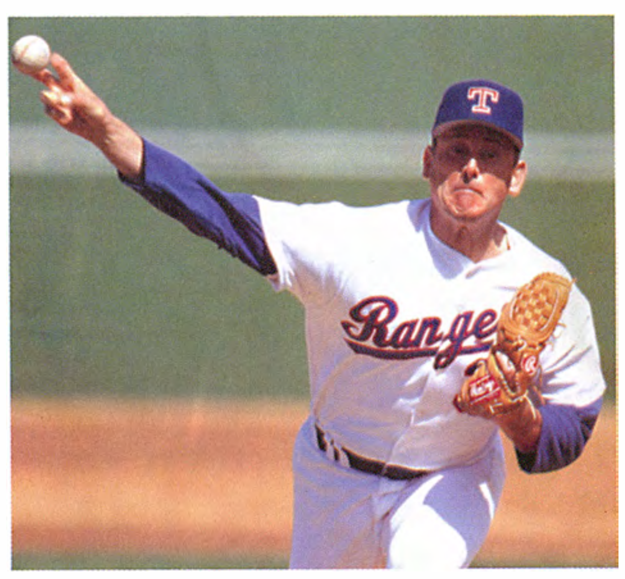
7. EL MODELO DARWINISTA DEL PENSAMIENTO sugiere que las ideas compiten entre sí por el "espacio de trabajo" dentro del cerebro. Cuando una persona elige entre una manzana y un plátano (*a*), resulta verosímil que aparezcan en la corteza (*hexágono*) los patrones espaciotemporales de la actividad nerviosa que representan esas posibilidades (*rojos para la manzana, amarillos para el plátano*). Empiezan a proliferar copias de cada patrón, a un ritmo que depende de las experiencias del individuo y de las impresiones sensoriales (*b*). Llega un momento en que el número de copias rebasa un umbral, y la persona hace la elección correspondiente —en este caso, decidiéndose por la manzana (*c*).

podrían persistir en el trasfondo como pensamiento subconsciente y sufrir variaciones. Cuando tratamos de recordar el nombre de alguien, al principio en vano, quizá los códigos candidatos continúen copiándose durante la siguiente media hora, hasta que, de pronto, el nombre de Juana Martínez parece "invadirte la cabeza", porque tus variaciones sobre el tema espaciotemporal hallan finalmente una resonancia y crean una decisiva masa de copias idénticas. Nuestro pensamiento consciente tal vez sea sólo el dominio ordinario de un modelo en la competición de copias, con muchas otras variantes pugnando por conseguir ese dominio, una de las cuales ganará un momento después, cuando nuestros pensamientos parezcan cambiar de foco de atención.

Puede que los procesos darwinistas sean el azúcar glaseado sobre el pastel cognitivo, que gran parte de nuestro pensar sea rutinario o esté sometido a estrictas reglas. Pero a menudo nos enfrentamos, con habilidad creadora, a situaciones nuevas; sucede así cuando decidimos qué dar de cena esta noche: miramos lo que hay en el frigorífico y en la alacena; pensamos en diversas alternativas, teniendo en cuenta qué otras cosas deberíamos traer de la tienda. Todo ello nos pasa por la mente en pocos segundos; es probable que estemos ante un proceso darwinista en funcionamiento.

La inteligencia humana, filogenética y ontogénicamente, resuelve primero problemas de movimiento y sólo más tarde se eleva para habérselas con otros más abstractos. Una inteligencia artificial o extraterrestre, liberada de la necesidad de buscar comida y evitar a los depredadores, tal vez no tendría necesidad de moverse; y así podría faltarle la orientación, propia de la inteligencia humana, hacia el suceso siguiente. Quizá se puedan alcanzar de otros modos altas cotas de inteligencia, pero el paradigma que conocemos es el del ascenso a partir del movimiento.

Resulta difícil estimar la frecuencia con que podría emerger la inteligencia superior, dado lo poco que sabemos sobre las exigencias a largo plazo de la supervivencia de las especies y sobre el curso que pueda seguir la evolución. Podemos, no obstante, comparar las perspectivas de diferentes especies preguntándonos cuántos elementos de inteligencia ha acumulado cada una.



8. EN EL MOVIMIENTO DE LANZAMIENTO sobresalen los humanos, a pesar de que durante la mayor parte del mismo falta una retroalimentación eficaz que proceda del brazo. Antes de que el lanzador inicie su acción, el cerebro ha de planear la serie de contracciones musculares que dispararán la pelota hacia un blanco. Algunos de los mecanismos neurales que planifican tales movimientos podrían extender su influjo a otros tipos de planificación.

¿Tienen esas especies un amplio repertorio de movimientos, conceptos u otros útiles? ¿Toleran la confusión creadora que permite inventar de cuando en cuando categorías nuevas? Duane M. Rumbaugh advierte que monos y lémures incurren con frecuencia en la repetición del primer conjunto de reglas discriminativas que se les ha enseñado, a diferencia de lo que sucede con los monos rhesus (*Macaca mulatta*) y primates.

¿Dispone cada individuo de más de media docena de espacios de trabajo para sostener en concurrencia diferentes conceptos? ¿Posee tantos que pierde nuestra humana tendencia a "atarugar" ciertos conceptos, como cuando creamos la palabra "ambivalencia" para designar lo que valdría la pena describir con una frase? ¿Pueden los individuos establecer en sus espacios de trabajo nuevas relaciones entre los conceptos? Esas relaciones deberán ser más imaginativas que las de "es un" o "es mayor que", que ya captan muchos animales. Las relaciones dendriformes revisten particular interés en las estructuras lingüísticas; nuestra capacidad de comparar dos relaciones (analogía) posibilita el operar en un espacio metafórico.

¿Pueden los individuos moldear y refinar sus ideas originarias, antes de actuar en el mundo real? ¿Implica tal proceso los seis rasgos esenciales más algunos factores acelerantes, atajos que permitan iniciar el proceso desde un nivel algo más alto que el primitivo? ¿Les es posible a los individuos hacer conjeturas tanto sobre estrategias a largo plazo como sobre tácticas a corto plazo, de suerte que con sus movimientos puedan establecer ventajosamente el escenario para las acciones futuras?

A los chimpancés acaso les falten unos cuantos de estos elementos, pero operan mejor que la actual generación de programas de inteligencia artificial. Hasta en los seres que contasen con todos los elementos aludidos serían de esperar considerables variaciones en punto a inteligencia, debidas a las diferencias individuales en velocidad de procesamiento, en perseverancia, en seguir atajos suplementarios y en hallar el apropiado nivel de abstracción al emplear analogías.

¿Por qué no hay más especies dotadas de tan complejos estados mentales? Cierto grado de inteligencia puede ser cosa peligrosa. Una inteligencia superior a la de los primates ha de navegar constantemente entre los dos escollos de la aventurada innovación y de un conservadurismo que ignore lo que la Reina Roja le explicara a Alicia en *A través del espejo:* "...hace falta correr todo lo que puedas, para permanecer en el mismo lugar". Nuestra especial forma de correr es la previsión, esencial para la administración inteligente.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

THE ASCENT OF MIND: ICE AGE CLIMATE AND THE EVOLUTION OF INTELLIGENCE. William H. Calvin. Bantam Books, 1991.

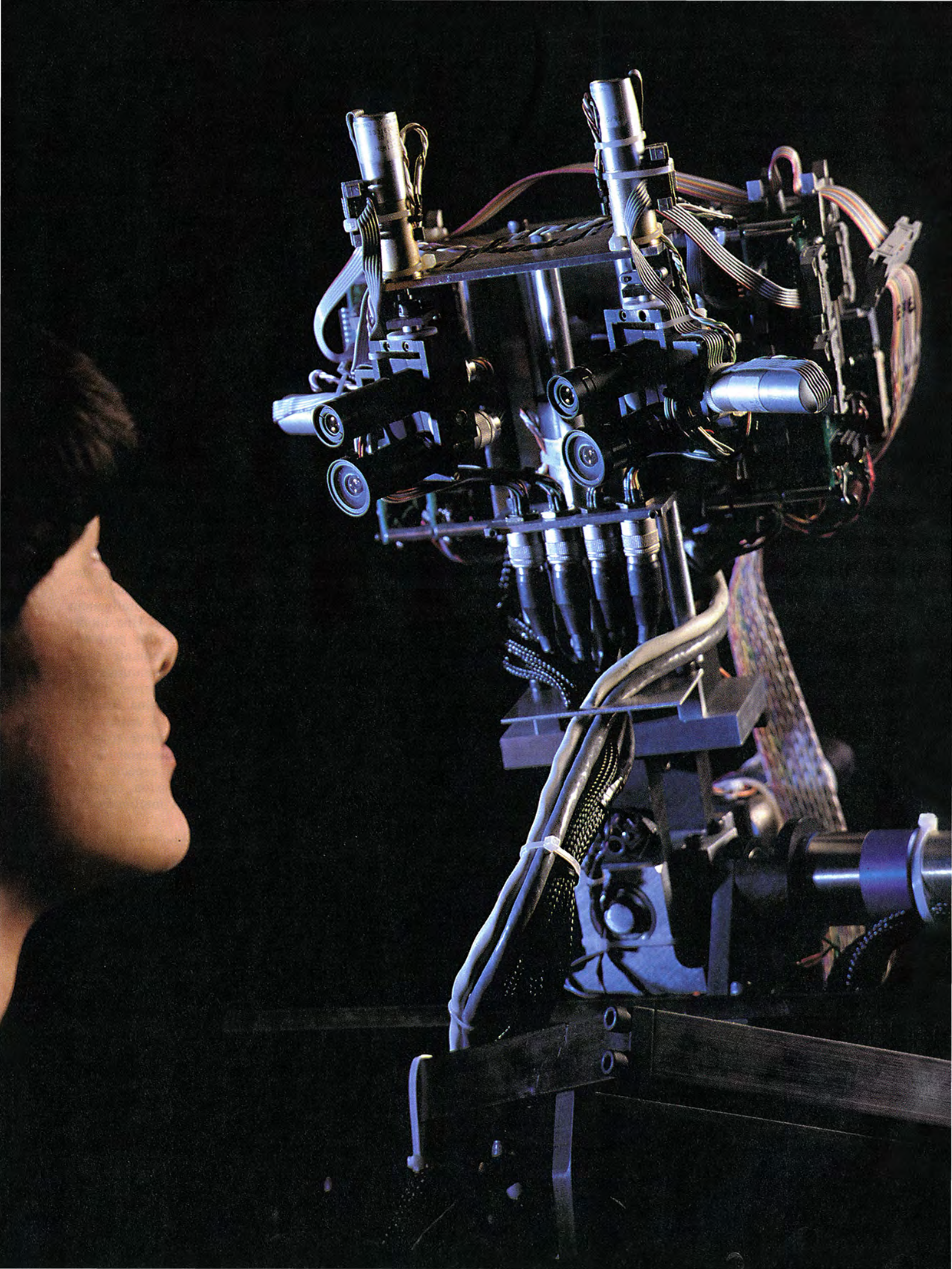
LANGUAGE COMPREHENSION IN APE AND CHILD. E. Sue Savage-Rumbaugh, Jeannine Murphy, Rose A. Sevcik, Karen E. Brakke, Shelley L. Williams y Duane Rumbaugh. University of Chicago Press, 1993.

TOOLS, LANGUAGE AND COGNITION IN HUMAN EVOLUTION. Dirigido por Kathleen R. Gibson y Tim Ingold. Cambridge University Press, 1993.

CONVERSATIONS WITH NEIL'S BRAIN: THE NEURAL NATURE OF THOUGHT AND LANGUAGE. William H. Calvin y George A. Ojemann. Addison-Wesley, 1994.

THE LANGUAGE INSTINCT. Steven Pinker. William Morrow, 1994.

WHAT IS INTELLIGENCE? Editado por Jean Khalfa. Cambridge University Press, 1994.



¿Serán los robots quienes hereden la Tierra?

Así será, pues la nanotecnología permitirá crear cuerpos y cerebros de repuesto. Entonces viviremos más, poseeremos mayor sabiduría y gozaremos de facultades inimaginadas

Marvin Minsky

Acostarse cedo y alzarse con presteza
dan al hombre saber, salud
y riqueza.
—Benjamin Franklin

Todos aspiramos a la sabiduría y a la riqueza. Nuestra salud, sin embargo, suele agotarse antes de haberlas conseguido. Para prolongar nuestras vidas y perfeccionar nuestras mentes sería necesario cambiar nuestros cuerpos y nuestros cerebros. A tal objeto convendrá primero examinar la forma en que la evolución darwinista tradicional nos ha llevado hasta el punto en que estamos. Habremos después de imaginar cómo se podría resolver el debilitamiento de nuestra salud sustituyendo las partes desgastadas de nuestros organismos por elementos de repuesto de nuevos tipos. A continuación habremos de inventar métodos que potencien nuestros cerebros permitiéndonos adquirir mayor sabiduría. Al final, mediante nanotecnología, los sustituiremos por completo. Una vez liberados de las limitaciones de la biología, decidiremos la duración de nuestras vidas —con opción a la inmortalidad— y podremos optar también a otras facultades que ahora no podemos ni imaginar.

Como es obvio, resulta difícil imaginar tales cambios, y muchos pensadores siguen arguyendo que estos progresos son imposibles, especialmente en el dominio de la inteligencia artificial. Pero las ciencias necesarias para ponerlos en práctica se encuentran ya en gestación, y es hora de considerar qué aspecto podría ofrecer ese mundo nuevo.

1. COG, que se está construyendo en el Instituto de Tecnología de Massachusetts, tendrá ojos, oídos y brazos mecánicos, conectados a una red de microprocesadores que harán de cerebro. Sus creadores confían en que el sistema aprenda a reconocer rostros, a seguir la pista de objetos y a responder en general a una pléyade de estímulos visuales y auditivos de su ambiente, como lo haría un bebé.

No podrá llegarse a él por medios biológicos. Es mucho lo que hemos aprendido últimamente sobre la salud y su cuidado. Hemos ideado millares de tratamientos específicos para enfermedades y defectos determinados, mas no parece que haya aumentado la duración máxima de nuestra vida. Benjamin Franklin vivió 84 años y nadie ha vivido jamás el doble, salvo en los mitos y leyendas populares. Según estimaciones del profesor de patología Roy L. Walford, la duración media de la vida humana era de unos 22 años en la Roma antigua y de unos 50 en los países desarrollados hacia 1900, donde en la actualidad ronda los 75 años. A pesar de los aumentos, cada una de las correspondientes curvas de supervivencia parece concluir abruptamente en torno a los 115 años. Siglos de mejoras en el cuidado de la salud no han tenido efecto sobre tal máximo.

¿Por qué es tan limitada la duración de nuestra vida? La respuesta es sencilla: la selección natural favorece los genes de quienes más descendientes tengan, cuyo número tiende a crecer exponencialmente con el de generaciones; por ello la selección natural prefiere los genes de quienes se reproducen a edades tempranas. Por lo general, la evolución no tiende a preservar genes que prolonguen la vida más allá de lo necesario para que los adultos cuiden de sus retoños. De hecho, puede incluso que favorezca a la descendencia que no tiene que competir con progenitores vivos, pues tal competencia pudiera promover la acreción de genes letales. Por ejemplo, el pulpo mediterráneo deja de alimentarse al poco de frezar y muere de inanición. No obstante, si se le extirpa cierta glándula, sigue alimentándose y vive el doble. Otros animales están programados para morir poco después de cesar su reproducción. Entre las excepciones a este fenómeno se cuentan los seres humanos y los elefantes, cuya progenie aprende mucho merced a la transmisión social de conocimiento acumulado.

Nosotros, los seres humanos, parecemos ser los más longevos animales de sangre caliente. ¿Qué presión selectiva pudo haber desembocado en nuestra actual longevidad, que casi duplica la de nuestros otros parientes primates? La respuesta tiene que ver con la sabiduría. Nuestras criaturas son, de todos los mamíferos, las peor equipadas para sobrevivir por sí solas. Es posible que no sólo necesitemos padres, sino también abuelos que cuiden de nosotros y nos den consejos de precioso valor para la supervivencia.

Pero incluso así asesorados, son muchas las causas de mortalidad que podrían hacernos sucumbir. Cierto número de decesos se deben a infecciones. Nuestros sistemas inmunitarios han alcanzado por evolución versátiles procedimientos con los que afrontar la mayoría de las enfermedades de este tipo. Por desgracia, ocurre no pocas veces que esos mismos sistemas inmunitarios nos lesionan, pues dan a algunas partes de nuestro organismo tratamiento igual que si de invasores infecciosos se

MARVIN MINSKY, uno de los adelantados de la inteligencia artificial y de la robótica, comenzó su carrera estudiando matemáticas, física, biología y psicología en las universidades de Harvard y Princeton. Actualmente trabaja en varios laboratorios del Instituto de Tecnología de Massachusetts (MIT).

tratase. Esta ceguera autoinmunitaria es causa de enfermedades como la diabetes, la esclerosis múltiple, la artritis reumatoide y muchas otras.

Sufrimos también lesiones que nuestros organismos no pueden reparar: accidentes, desequilibrios nutricionales, tóxicos químicos, calor, radiación y un sinfín de otras influencias que pueden deformar o alterar químicamente las moléculas de nuestras células, incapacitándolas para funcionar. Algunos de estos errores se corrigen reemplazando las moléculas defectuosas. Pero cuando la tasa de reposición es demasiado baja aparecen los problemas. Por ejemplo, cuando las proteínas de los cristalinos pierden su elasticidad, perdemos la capacidad de enfoque y hemos de usar gafas bifocales, inventadas, por cierto, por Benjamin Franklin.

Las principales causas de fallecimiento natural resultan de los efectos de genes heredados, entre los que se cuentan los considerados responsables principales de las enfermedades cardíacas y de los cánceres —dos de las mayores causas de mortalidad—, amén de un sinnúmero de otros trastornos, como la fibrosis quística o la anemia falciforme. Es posible que nuevas técnicas logren evitar algunas de estas afecciones reemplazando los genes correspondientes.

Lo más verosímil es que la senescencia sea inexorable en todos los organismos biológicos. Por si acaso, mencionemos que ciertas especies (entre las que figuran algunas variedades de peces, tortugas y langostas marinas) no parecen mostrar incrementos sistemáticos de mortalidad al envejecer. Se cree que estos animales mueren sobre todo por causas externas, como la depredación o la falta de alimento. De todas formas, no tenemos constancia de animales que hayan vivido 200 años, aunque ello no demuestra que no exista ninguno. Walford y muchos otros creen que una dieta cuidadosamente diseñada, que limite estrictamente la aportación de calorías, podría prolongar notoriamente el lapso de vida de los seres humanos, pero no, en definitiva, evitar su muerte.

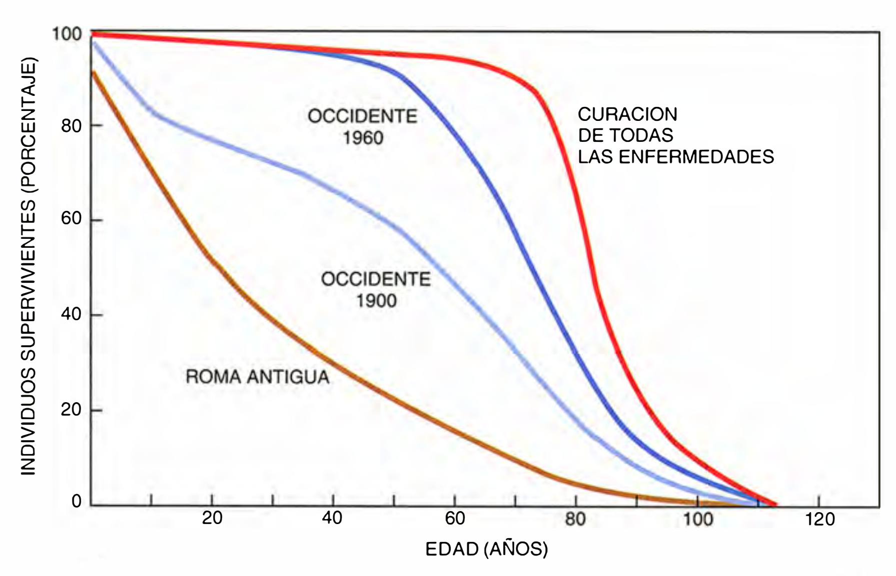
Si supiéramos más acerca de nuestros genes podríamos alcanzar a corregir, o a posponer cuando menos, muchas dolencias que aún son tormento de nuestros años postreros. De todos modos, aunque llegásemos a descubrir un remedio para cada enfermedad específica, tendríamos todavía que afrontar el problema del “desgaste” general. La función normal de cada célula comporta millares de procesos químicos, cada uno de los cuales incurre a veces en errores debidos al azar. Nuestros organismos se valen de técnicas de corrección de muchas clases, activada cada una por un error específico. Pero dichos fallos aleatorios se producen de tantas y tan diferentes formas que ningún método de detalle puede corregirlos todos.

El problema estriba en que nuestros sistemas genéticos no se diseñaron para efectuar un mantenimiento a muy largo plazo. La relación entre genes y células es extremadamente indirecta; no existen planos ni mapas que sirvan de guía a nuestros genes cuando construyen y reconstruyen el cuerpo. Para reparar los defectos de mayor escala, los organismos necesitarían una especie de catálogo que detallase qué tipos de células han de estar localizadas en cada sitio. Tal redundancia es fácil de instalar en los programas informáticos. Muchos ordenadores mantienen copias intactas de los programas más críticos del sistema, cuya integridad se comprueba periódicamente. No hay animales que hayan producido evolutivamente sistemas equivalentes, quizá porque tales algoritmos no pueden desarrollarse por selección natural. La dificultad estriba en que la corrección de errores impediría las mutaciones, lo cual, en última instancia, frenaría tanto el ritmo de evolución de los descendientes de un ser dado que éstos serían incapaces de adaptarse a los cambios medioambientales.

¿Podríamos vivir varios siglos sin más que cambiar cierto número de genes? Después de todo, ahora nos diferenciamos de nuestros parientes antropomorfos, los gorilas y los chimpancés, en sólo algunos millares de genes; empero, nuestras vidas duran casi el doble que las suyas. Suponiendo que haya sido sólo una pequeña fracción de esos nuevos genes la responsable del aumento de la duración de la vida, tal vez no sean más de, digamos, cien los que hayan intervenido. Mas, aunque así resultara, ello no garantizaría que pudiéramos ganar otro siglo cambiando otro centenar de genes. Tal vez necesitásemos cambiar sólo unos pocos; tal vez, muchísimos más.

La construcción e instalación de genes nuevos va poco a poco tornándose factible. De todos modos, estamos valiéndonos ya de otro método de combatir el desgaste y el destrozo biológicos, a saber, la sustitución del órgano defectuoso por otro de repuesto, sea biológico o artificial. Ciertas sustituciones son ya cosa de rutina; otras apuntan por el horizonte. Un corazón no es más que una bomba muy lista. Los músculos y los huesos son motores y vigas y los aparatos digestivos son reactores químicos. Al final acabaremos descubriendo formas de trasplantar o reemplazar todas estas piezas.

Pero cuando se trate del cerebro el trasplante no funcionará, ya que no puede intercambiarse sin más nuestro cerebro por otro y seguir siendo la misma persona. Perderíamos el acervo de conocimientos y modos de actuar que constituye nuestra identidad. Podríamos, sin embargo, reemplazar ciertas partes desgastadas de nuestro



2. LA ESPERANZA DE VIDA humana ha ido aumentando con el tiempo, conforme han mejorado las condiciones económicas. En la Roma antigua (*marrón*) era de unos 22 años; rondaba los 50 en los países desarrollados de 1900 (*azul*), donde actualmente es de 75 años (*azul oscuro*). Aunque encontrásemos remedio para todas las enfermedades (*rojo*), es muy probable que nuestros cuerpos se agoten hacia los 115 años.

cerebro trasplantando tejidos cultivados de células fetales. Tal proceder no restauraría el conocimiento perdido, pero eso podría no ser tan importante como parece. Es probable que conservemos cada fragmento de nuestro saber en varios lugares y bajo diferentes formas. Las piezas cerebrales nuevas podrían volverse a educar integrándolas al resto; incluso es posible que ello se produjera de forma espontánea, al menos en parte.

Mucho me temo que, incluso antes de que nuestros cuerpos se desgasten, nos topamos con las limitaciones de nuestras facultades mentales. Parece como si nuestro desarrollo intelectual, en cuanto especie, hubiera alcanzado algún tipo de meseta. No hay señales de que estemos adquiriendo mayor inteligencia. ¿Fue Albert Einstein mejor científico que Isaac Newton o que Arquímedes? ¿Han sido superados William Shakespeare o Eurípides por algún dramaturgo de tiempos recientes? Es mucho lo que hemos aprendido en 2000 años, pero buena parte de la sabiduría antigua sigue pareciéndonos bien fundada, lo que me hace pensar que no hemos progresado gran cosa. Seguimos ignorando cómo resolver los conflictos entre las ambiciones individuales y los intereses colectivos. Somos tan ineptos para tomar decisiones importantes que siempre que podemos dejamos al azar aquello de lo que no estamos seguros.

¿Por qué es tan limitada nuestra sabiduría? ¿Se debe a que no disponemos del tiempo necesario para aprender mucho o a que carecemos de la capacidad suficiente? ¿Será debido a que utilizamos sólo una pequeña parte de nuestros cerebros, como se dice a menudo? ¿Serviría de algo una enseñanza de mejor calidad? Es obvio que sí, pero sólo hasta cierto punto; ni siquiera nuestros mejores prodigios pasan de aprender a doble velocidad que los demás. Tardamos demasiado en aprender cualquier cosa porque nuestros cerebros son tremendamente lentos. Sería de gran ayuda, desde luego, disponer de más tiempo, pero la sola longevidad no basta. Al igual que otros entes finitos, el cerebro ha de topar con limitaciones a lo que puede aprender. No sabemos qué límites son ésos; tal vez nuestros cerebros pudieran seguir aprendiendo durante varios siglos más. Pero en algún momento necesitaremos aumentar su capacidad.



3. HORMIGAS de la especie *Lasius niger* formando enjambre. Se sabe de una de sus reinas que ha vivido 27 años. No se tiene constancia de ningún animal que se reproduzca sexualmente y haya vivido más de 200 años, aunque pudiera existir.

Cuanto más sepamos sobre el cerebro, más vías descubriremos para perfeccionarlo. Cada cerebro posee cientos de regiones especializadas. Apenas sabemos un poco de lo que hace cada una o de cómo lo hace, pero tan pronto averigüemos de qué manera funciona una parte cualquiera, los investigadores tratarán de idear procedimientos para ampliar su capacidad. Idearán también facultades enteramente nuevas, que la biología jamás ha ofrecido. Conforme estos inventos vayan haciéndose habituales, trataremos de conectarlos a nuestros cerebros, quién sabe si a través de millones de electrodos microscópicos insertos en el gran haz de nervios denominado cuerpo calloso, el mayor "bus" de datos cerebral. Tras nuevos progresos, ninguna zona encefálica estará excluida del acoplamiento de nuevos accesorios. En última instancia, encontraremos formas de reemplazar todas las partes del cuerpo y del cerebro y de reparar así todas las deficiencias y lesiones que tan breves hacen nuestras vidas.

Inútil es decir que con ello estaremos convirtiéndonos en máquinas. ¿Significa eso que seremos reemplazados por máquinas? Mi impresión es que no tiene mucho sentido enfocar la cuestión en términos de "ellas" y de "nosotros". Prefiero con mucho el punto de vista del profesor Hans P. Moravec, quien propone que consideremos a estas máquinas inteligentes del futuro como a nuestros propios "hijos mentales".

Hasta ahora hemos tendido a vernos como producto final de la evolución, pero la evolución no ha cesado. La verdad es que ahora estamos evolucionando más rápidamente, aunque no por el lento procedimiento darwinista. Ya es hora de que empecemos a pensar en nuestras nuevas identidades, que están aflorando. Podemos comenzar a diseñar sistemas fundados en tipos ingeniosos de "selección innatural", dirigidos al cumplimiento de planes y objetivos específicos y capaces de sacar partido de características adquiridas. Ha hecho falta un siglo de educación evolucionista para proscribir tales ideas —que los biólogos califican de "teleológicas" y "lamarckianas"—, pero puede que ahora tengamos que cambiar las reglas.

Casi todo el conocimiento que amasamos está alojado en diversas redes del interior de nuestro cerebro, consistentes en enormes números de diminutas células nerviosas y de estructuras más pequeñas todavía, las llamadas sinapsis, que controlan la forma en que pasan las señales de una célula a otra. Para construir un repuesto de un cerebro humano necesitaríamos saber algo sobre la forma en que cada una de las sinapsis se relaciona con las dos células que conecta. También tendríamos que saber cómo responden estas estructuras a los diversos campos eléctricos, hormonas, neurotransmisores, nutrientes y demás compuestos químicos que hay en su entorno. Un cerebro humano contiene billones de sinapsis, por lo que tal requisito no es cosa baladí.

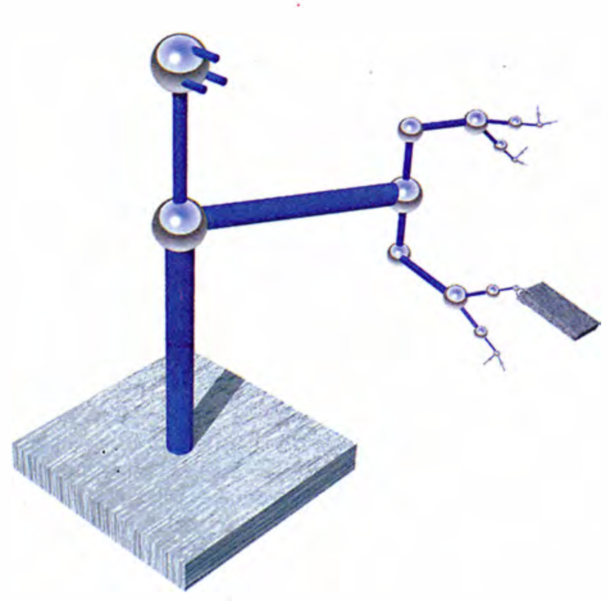
Mas, por fortuna, no necesitamos conocer el último de los detalles. Por lo pronto, si los detalles fuesen importantes nuestros cerebros no podrían funcionar. Los sistemas concretos de los organismos biológicos han solido evolucionar para hacerse insensibles a la mayoría de los detalles que acontecen en los subsistemas menores de los que dependen. Por consiguiente, para copiar un cerebro que funcionase bastaría con reproducir lo justo de la función de cada parte para que se produjesen los efectos importantes sobre otras partes.

Supongamos necesario copiar una máquina que, como le sucede a un cerebro, contuviese un billón de componentes. Tal cosa sería imposible en nuestros días si tuviéramos que construir cada elemento por separado, aun cuando supiésemos cómo hacerlo. Pero si tuviéramos un millón de máquinas constructoras, capaces cada una de producir mil piezas por segundo, la tarea sería mera cuestión de minutos. Nuevas máquinas fabriles permitirán hacerlo en los decenios venideros. Casi todas las manufacturas de nuestros días consisten en conformar materiales en bruto. La nanotecnología, por el contrario, aspira a construir los materiales y la maquinaria colocando cada átomo y cada molécula en el lugar preciso deseado.

Con tales métodos podríamos construir piezas verdaderamente idénticas y evitar así la aleatoriedad que padecen las máquinas habituales. En la actualidad, por ejemplo, cuando se trata de grabar circuitos muy pequeños, los tamaños de los conductores varían tanto que resulta imposible predecir sus propiedades eléctricas. En cambio, si pudiéramos ubicar exactamente cada átomo, todos los conductores mostrarían idéntico comportamiento. Esta capacidad desembocaría en materiales de nuevos tipos, que las técnicas actuales jamás podrían conseguir; podríamos dotarlos de enorme resistencia o de propiedades cuánticas nuevas. A su vez, estos productos podrían permitir computadoras tan pequeñas como las sinapsis, cuya eficacia y velocidad no tuvieran parangón.

En cuanto pudiéramos utilizar estas técnicas para construir una máquina ensambladora de aplicación general que operase a escalas atómicas, el progreso ulterior resultaría rápido. Si tal máquina tardase una semana en realizar una copia de sí misma, en menos de un año podríamos tener mil millones de ellas. Tales dispositivos transformarían el mundo. Podríamos hacerles fabricar artilugios eficaces de captación de la energía solar y adosarlos a superficies cercanas, por ejemplo, con lo que ellos mismos generarían la energía que necesitasen. Podríamos cultivar campos de microfactorías de forma muy parecida a como cultivamos plantas. En un futuro como el descrito apenas tendríamos dificultad para conseguir riqueza; los problemas estarían en saber administrarla. En concreto, habría de tenerse mucho cuidado en mantener bajo control a aquellos entes que (como es nuestro caso) tuviesen la facultad de reproducirse.

Al considerar la posibilidad de complementar nuestros cerebros, podríamos empezar preguntándonos cuánto sabe hoy una persona. Thomas K. Landauer ha pasado revista a muchos experimentos en los que se les pedía a los sujetos que leyeran textos, mirasen imágenes o escuchasen palabras, frases, pasajes musicales breves y sílabas sin sentido. Luego se les sometía a una prueba para ver cuánto recordaban. En ninguna de estas situaciones pudieron aprender y recordar luego más de un par de bits por segundo durante un período prolongado. Si pudiese mantenerse este ritmo de aprendizaje durante doce horas diarias a lo largo de cien años, el total sería de unos tres mil millones de bits, menos de lo que en la actualidad podemos almacenar en un disco compacto ordinario de trece centímetros. Dentro de diez años, más o menos, puede que tal cantidad se aloje en un solo microcircuito.



4. **MANO DENDRITICA de un robot, diseñada (pero no construida todavía) por el autor e, independientemente, por Hans P. Moravec, de la Universidad Carnegie Mellon. Está compuesta por muchas unidades similares de distintos tamaños. En el futuro, la construcción de tales robots será sencilla, debido a su uniformidad.**

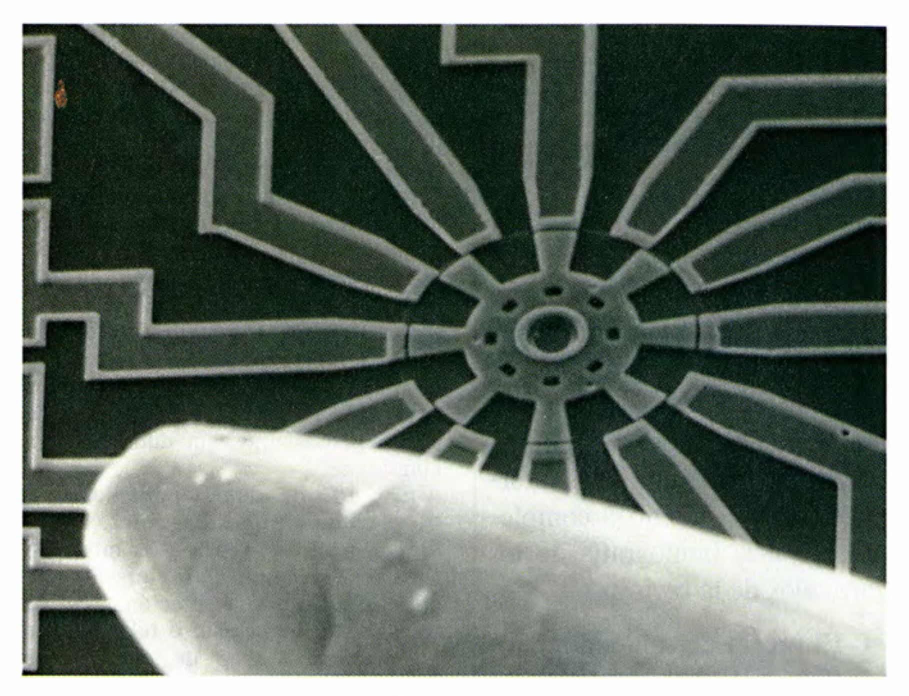
Aunque tales experimentos no se parezcan gran cosa a lo que hacemos en la vida ordinaria, no tenemos pruebas claras de que las personas puedan aprender más rápidamente. A pesar de lo mucho que se habla de individuos con "memoria fotográfica", nadie parece haber dominado nunca, palabra por palabra, el contenido de cien libros o de alguna de las principales enciclopedias. Las obras completas de Shakespeare vienen a suponer unos 130 millones de bits. El límite de Landauer implica que una persona tardaría al menos cuatro años en aprendérselas de memoria. No disponemos de estimaciones fundadas sobre la cantidad de información necesaria para pintar o para esquiar, pero no veo razón alguna para suponer que tales actividades no sufran limitaciones análogas.

Se cree que el cerebro contiene alrededor de 100 billones de sinapsis, con lo que tendría espacio sobrado para esos pocos miles de millones de bits recordables. Algún día, merced a la nanotecnología, podría acomodarse todo ese espacio de almacenamiento en un paquetito no mayor que un guisante.

En cuanto sepamos lo que necesitamos hacer, nuestras nanotécnicas nos permitirán construir cuerpos y cerebros de repuesto no constreñidos a trabajar al paso de tortuga del "tiempo real". Los fenómenos de los microcircuitos actuales ya son millones de veces más rápidos que los de las neuronas cerebrales. Podríamos, por lo tanto, diseñar a nuestros "niños mentales" para que pensasen un millón de veces más rápido que nosotros. A uno de tales seres, medio minuto le parecería tan largo como a nosotros un año, y una hora, como toda una vida.

Pero ¿podrían existir realmente? Hay estudiosos de disciplinas muy variadas que mantienen con firmeza que las máquinas jamás tendrán pensamientos como los nuestros porque, de cualquier forma que se las construya, carecerán siempre de un ingrediente vital. Al referirse a esta esencia ausente, dichos pensadores le dan diversos nombres, como sensibilidad, conciencia, espíritu o alma. Los filósofos han escrito libros enteros para demostrar que, debido a tal carencia, las máquinas no podrán jamás sentir o comprender la clase de cosas que hacen las personas. Sin embargo, todas las demostraciones que ofrecen estos libros incurren en círculo vicioso, pues de una u otra forma toman como hipótesis precisamente lo que pretenden demostrar, a saber, la existencia de un hálito mágico que no posee propiedades detectables. No soporto tales argumentos. No hace falta que busquemos la pieza concreta que falta: el pensamiento humano consta de mu-

chos ingredientes y cada una de las máquinas que hemos construido carece de docenas o de centenares de ellos. Comparemos lo que hacen hoy los ordenadores con lo que llamamos pensar. Resulta claro que el pensamiento humano es mucho más flexible, más adaptable y posee muchos más recursos. En los programas informáticos de nuestros días, cuando algo va mal, aunque sea muy poco, la máquina sufre una detención o genera resultados sin valor. Cuando una persona piensa es muy frecuente que cometa errores o lo haga mal; sin embargo, tales inconvenientes rara vez nos detienen. Lo que hacemos, en cambio, es probar otra cosa. Examinamos nuestro problema desde un ángulo diferente y pasamos a otra estrategia. ¿Qué nos capacita para hacer esto?



5. UN MICROMOTOR, bajo la punta de un alfiler. Conforme se vayan descubriendo métodos de construcción de dispositivos cada vez más pequeños, podrán construirse microfactorías completas, movidas por energía luminosa y autorreproducibles.

Tengo sobre mi escritorio un libro de texto dedicado al cerebro cuyo índice ocupa unas seis mil líneas, relativas a centenares de estructuras especializadas. Una lesión accidental de determinados de estos componentes podría hacernos perder la capacidad de recordar los nombres de animales; otra podría incapacitarnos para hacer planes a largo plazo y una tercera nos volvería proclives a soltar palabrotas en los momentos más inesperados, por haber sufrido daños el mecanismo que nomalmente censura tales expresiones. Sabemos, por miles de hechos semejantes, que el cerebro contiene mecanismos de diversas clases. Por lo tanto, nuestro saber está representado de diversas formas, almacenadas a su vez en distintas regiones del cerebro para ser utilizadas en diferentes procesos. ¿Qué aspecto ofrecen estas representaciones? Todavía no lo sabemos.

Pero en el campo de la inteligencia artificial los investigadores han descubierto varios procedimientos útiles para la representación de conocimientos, cada uno de ellos más adaptado que los demás para un determinado propósito. Los más populares se valen de colecciones de reglas condicionales, reglas del tipo "Si..., entonces...". Otros sistemas recurren a "marcos conceptuales", estructuras parecidas a formularios que es preciso rellenar. Hay programas que se valen de redes "en telaraña", o de esquemas arbóreos o de listas llamadas "guiones". Ciertos sistemas almacenan conocimientos en frases que recuerdan al lenguaje natural o a las expresiones de la lógica matemática. Cuando un programador aborda un trabajo nuevo, empieza tratando de determinar qué representación será la más idónea para la tarea de que se trate. Lo típico es que un programa informático utilice una sola representación, la cual, si falla, puede provocar que todo el sistema se venga abajo. Esta deficiencia justifica la queja, muy frecuente, de que los ordenadores en realidad "no comprenden" lo que hacen.

¿Qué significa comprender? Muchos filósofos han declarado que la comprensión (o la significación, o la conciencia) ha de constituir una facultad básica que sólo puede poseer una mente viva. A mi entender, tales asertos indican "envidia de la física", celos de la perfección con que la física ha podido explicar tantas cosas a partir de un número muy reducido de principios. Los físicos han tenido mucho éxito rechazando todas las explicaciones que les parecen demasiado complicadas y esforzándose en cambio en buscar otras más sencillas. Este método, empero, no funciona cuando nos ocupamos de toda la complejidad del cerebro. Ha aquí un párrafo de lo que expuse en mi libro *The Society of Mind* al respecto de la facultad de comprender:

"Si entendemos algo sólo de una manera, en realidad no lo entendemos en absoluto. Y es así porque, si algo va mal, nos quedamos atascados con un único pensamiento, que se instala en nuestra mente sin tener adónde ir. El secreto de lo que algo significa para nosotros está en cómo hemos conectado ese algo con todas las demás cosas que conocemos. Esta es la razón de que cuando alguien aprende algo 'de memoria' digamos que no lo ha comprendido de verdad. Sin embargo, cuando se tienen varias representaciones diferentes, si un método falla se puede ensayar otro. Es evidente que si se establece un número excesivo de conexiones indiscriminadas la mente se convertirá en un barullo. En cambio, unas representaciones debidamente interconectadas nos permitirán dar vueltas en la mente a nuestras ideas, considerar las cosas desde muchas perspectivas, hasta encontrar la adecuada para nosotros. ¡Y eso es lo que entendemos por pensar!"

A mi entender, es la flexibilidad la que explica por qué a nosotros nos resulta fácil pensar, mientras que para los ordenadores es muy difícil. En *The Society of Mind* propongo que el cerebro rara vez se vale de una única representación. Lo que hace, en cambio, es poner en funcionamiento varias tramas o argumentos a la vez, con lo que siempre tiene disponibles múltiples puntos de vista. Además, cada sistema está supervisado por otros de nivel más alto, que van controlando cómo se desenvuelven aquéllos y, en caso necesario, reformulan los problemas. Como las partes y los procesos cerebrales pueden tener deficiencias, deberíamos encontrar otras partes que se ocupen de detectar y enmendar tales fallos.

Para poder pensar eficazmente se necesitan procesos múltiples que nos ayuden a describir, predecir, explicar, abstraer y planificar lo que nuestra

mente debe hacer a continuación. La razón de que podamos pensar tan bien no estriba en que alojemos misteriosos talentos y dones ni chispas divinas, sino a que empleamos sociedades de agentes que operan concertadamente para impedir que nos atasquemos. Cuando descubramos cómo funcionan tales sociedades podremos instalarlas también en los ordenadores. Entonces, si se atasca alguno de los procedimientos de un programa, quizás otro pueda sugerir un método distinto. Si viéramos una máquina que hiciera tal tipo de cosas, pensaríamos sin duda que era consciente.

Este artículo atañe también a nuestro derecho a engendrar hijos, a modificar nuestros genes y a morir, si así lo deseamos. Ningún sistema ético de amplia aceptación, sea de fundamento humanista o religioso, se ha mostrado capaz de encarar los desafíos que ya hemos de afrontar. ¿Cuántas personas deberían ocupar la Tierra? ¿Qué clases de personas han de ser? ¿De qué forma debemos compartir el espacio disponible? Está claro que debemos cambiar nuestras ideas sobre la generación de nuevos hijos. En la actualidad, los individuos son concebidos por azar. En cambio, algún día, podrían ser "compuestos" atendiendo a deseos y designios meditados. Y, cuando construyamos nuevos cerebros, éstos no tendrían por qué echar a andar con tan pocos conocimientos sobre el mundo como lo hicieron los nuestros. ¿Qué clases de cosas tendrían que conocer nuestros "hijos mentales"? ¿Cuántos deberíamos producir y quién se habría de encargar de decidir sus atributos?

Los sistemas tradicionales de pensamiento ético se centran sobre todo en los individuos, como si éstos fueran las únicas entidades de valor. Es evidente que debemos considerar también los derechos y papeles de seres de mayor escala, que nos ayudan a comprender el mundo, como los superentes que conocemos por culturas y los sistemas, cada vez más grandes, que denominamos ciencias. ¿Cuántas de tales entidades queremos tener? ¿De qué tipo son las que necesitamos más? Deberíamos desconfiar de las que se encastillan en formas refractarias a todo crecimiento ulterior.

Traiga el ignoto futuro lo que fuere, ya estamos cambiando las reglas que nos crearon. La mayoría de nosotros tendrá miedo al cambio, pero otros desearán sin duda escapar de las limitaciones del presente. Cuando decidí escribir este artículo, quise saber qué opinión le merecían estas ideas a diversas personas. Descubrí con sorpresa que al menos tres cuartas partes de aquellos con quienes hablé parecían sentir que nuestras vidas ya eran demasiado largas. "¿Por qué habría nadie de querer vivir 500 años? ¿No sería un aburrimiento? ¿Y si sobreviviésemos a todos nuestros amigos? ¿Qué hacer con tantísimo tiempo?", me preguntaron. Era como si, secretamente, temieran no merecer vivir tanto. Me resulta no poco preocupante que sea tanta la gente resignada a morir. ¿No podría ser que tales personas, que sienten no tener gran cosa que perder, resultasen peligrosas?

Mis amigos investigadores no expresaron ninguna preocupación de este tipo. "Hay un sinfín de cosas que quiero averiguar, y son tantos los problemas que quiero resolver, que podría ocupar muchos siglos", me dijeron. Desde luego, la inmortalidad no resultaría atractiva si supusiera enfermedad, incapacidad y dependencia indefinida de otros; pero aquí estamos suponiendo un estado de salud perfecta. Algunas personas expresaron una preocupación más fundada: la de que los viejos deben morir porque se necesitan jóvenes que espiguen y desbrocen sus ideas ya agotadas. Empero, si es verdad, como temo, que estamos acercándonos a nuestros límites intelectuales, tal respuesta no sería muy certera. Seguiríamos apartados todavía de las magnas ideas pertenecientes a océanos de sabiduría situados más allá de nuestro alcance.

¿Serán robots los herederos de la Tierra? Sí, pero serán hijos nuestros. Debemos nuestras mentes a las muertes y a las vidas de todas las criaturas que han participado en la lucha que llamamos evolución. Nuestra tarea consiste en velar para que todo ese trabajo no acabe en puro desperdicio sin sentido.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

THE SOCIETY OF MIND. Marvin Minsky. Simon and Schuster, 1987. (*La sociedad de la mente*. Ed. Galápago. Buenos Aires, 1986.)

MIND CHILDREN. Hans Moravec. Harvard University Press, 1988.

THE EMPEROR'S NEW MIND. Roger Penrose. Oxford University Press, 1989. (*La nueva mente del emperador*. Mondadori. Barcelona, 1991.)

NANOSYSTEMS. K. Eric Drexler. John Wiley & Sons, 1992.

THE TURING OPTION. Marvin Minsky y Harry Harrison. Warner Books, 1992.



El mantenimiento de la vida sobre la Tierra

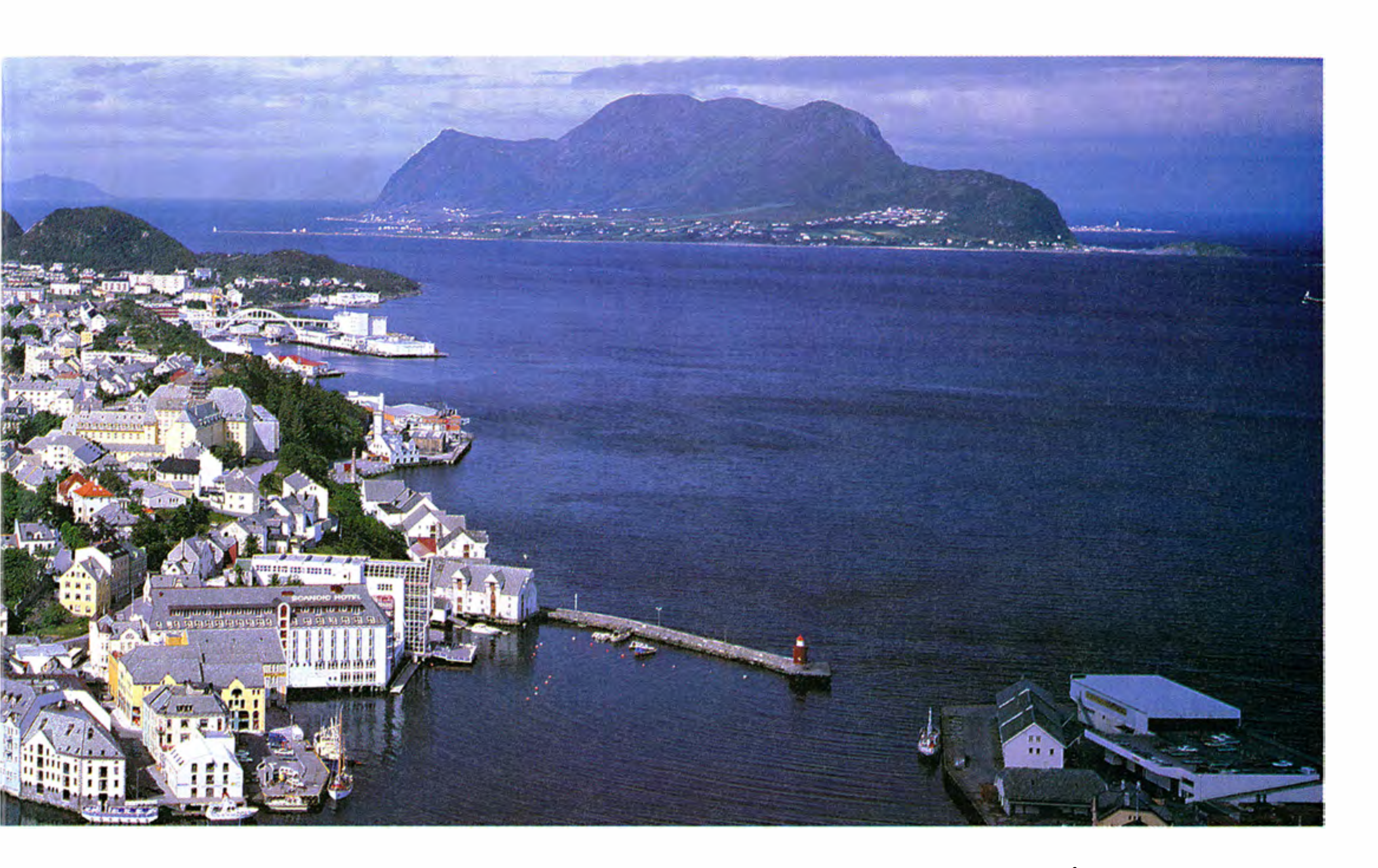
El cambio de actitud de las instituciones, los avances técnicos y la preocupación pública fundamentan las esperanzas de que el ambiente no sea una amenaza para nuestro futuro

Robert W. Kates

Puede mantenerse la vida sobre la Tierra? Si por vida entendemos simplemente materia orgánica capaz de reproducirse, la respuesta es casi sin dudarlo que sí. A través de los tiempos, la vida terrestre ha sobrevivido a repetidas catástrofes, incluyendo el cambio de la atmósfera, la subsidencia y levantamiento de los continentes y la colisión con asteroides. Es casi seguro que la vida seguirá al menos hasta el apagamiento definitivo de la luz de un Sol que terminará por enfriarse. Pero si por vida entendemos la mezcolanza de seres vivos que ahora ocupan los lugares habituales, entonces la respuesta es, casi sin reservas, que no. Porque las modificaciones del ambiente inducidas por los seres humanos, incluyendo las que afectan a los ciclos globales biogeoquímico e hidrológico, rivalizan con los cambios naturales de la Tierra. La mayor parte de las transformaciones de los últimos 10.000 años ha tenido lugar en el transcurso de nuestras propias vidas, pues los seres humanos continúan alterando su ambiente de maneras cada vez más diversas.

Si al decir vida nos referimos a nosotros mismos, a nuestra especie y a los demás seres vivos que nos mantienen, entonces la respuesta es "qui-

ROBERT W. KATES es un geógrafo y erudito independiente que vive en Trenton, Maine. Es profesor emérito de la Universidad de Brown. Entre 1986 y 1992 dirigió el Programa Alan Shawn Feinstein para el Hambre en el Mundo, en Brown. En la actualidad es editor ejecutivo de la revista *Environment* y ha sido presidente de la Asociación de Geógrafos Americanos.



1. **URBE EN CONTACTO CON LA NATURALEZA en Ålesund, Noruega, una ciudad insular en el distrito de Sunnmøre que es centro comercial y pesquero. Sus habitantes también trabajan en empresas de ingeniería y en algunas pequeñas granjas *(véase la isla del fondo, a la derecha)*. En esta región templada septentrional, el uso de recursos renovables y la planificación minuciosa de la industria, el comercio, la agricultura y el urbanismo equilibran la comunidad humana con su ambiente.**

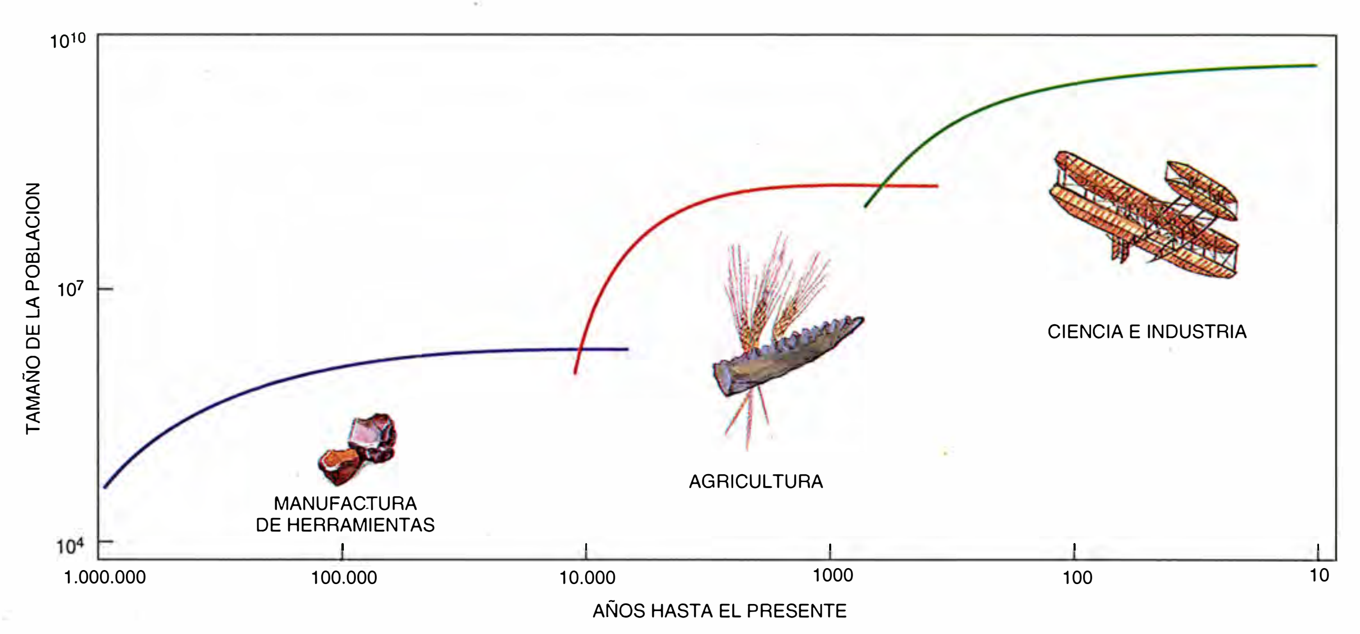
zá". Para los seres humanos la vida no ha sido nunca realmente un progreso continuado desde la cueva. Nuestro número ha crecido a trompicones, nuestras civilizaciones han florecido y desaparecido e incluso nuestro aspecto físico ha fluctuado a lo largo del tiempo. Pero desde mediados del pasado siglo nuestra población se ha cuadruplicado y las proyecciones de las Naciones Unidas y del Banco Mundial sugieren que al menos se volverá a duplicar para mediados del siglo que viene. La actividad económica amplificada por la técnica ya ha transformado la Tierra.

¿Cuál será el impacto que sobre los sistemas naturales que mantienen la vida tendrá un número tal de seres humanos, con sus cambiantes pautas de ocupación del espacio y su producción y consumo crecientes? Si podemos organizar una transición a un mundo más cálido, más superpoblado y más conectado, pero más diverso, puede haber esperanza de un futuro sostenible desde la perspectiva ambiental.

Un punto de vista recurrente sobre el crecimiento de la población mundial es la curva exponencial propuesta por Thomas Robert Malthus, quien pensaba que se derrumbaría al alcanzarse determinado máximo. Pero tal imagen, semejante a un cohete que se elevase acelerando hasta estallar, es equívoca. En el número de septiembre de 1960 de *Scientific American*, Edward S. Deevey Jr. ofreció una imagen distinta, gracias a la estimación retrospectiva del tamaño de la población humana hasta el origen de nuestra especie, dibujándolo a escala logarítmica. El análisis minucioso y extenso de Deevey reveló tres oleadas en el número de personas.

Cada oleada coincidía con una destacada revolución técnica, a saber, la aparición de la manufactura de utensilios, la expansión de la agricultura y el auge de la industria. Cada una de ellas transformó el significado de la palabra recursos y aumentó la capacidad de sustento de la Tierra. Y todas posibilitaron un período de crecimiento exponencial seguido por otro de práctica estabilidad. La revolución de la producción de herramientas, o cultural, que dio comienzo hace aproximadamente un millón de años, vio cómo el número de seres humanos alcanzaba los cinco millones. A lo largo de los 8000 años siguientes, a medida que se domesticaron plantas y animales y se inventaron la agricultura y la ganadería, la población se multiplicó por 100, hasta llegar a unos 500 millones. En la actualidad, en esta tercera oleada de población, ya hemos superado los 5600 millones (en lo que, en el mejor de los casos, es el punto medio de una proyección que muestra una duplicación o incluso una triplicación antes de que el crecimiento se nivele de nuevo) sólo 300 años después del inicio de la revolución científico-industrial.

E incluso esta tendencia general enmascara la existencia de un nivel más profundo de complejidad. Desde su comienzo probable en Africa, la vida humana se ha expandido de manera continuada hasta todos los rincones del globo, incluyendo la Antártida, donde los campamentos de investigación han alterado el yermo paisaje. Pero aunque el potencial de los seres humanos para sobrevivir e incluso prosperar en los lugares más inhóspitos se ha hecho realidad, la historia de la vida en algunos asentamientos longevos muestra notables fluctuaciones.



2. LA POBLACION HUMANA ha crecido de manera espectacular a lo largo del último millón de años. Lo ha hecho en tres etapas, cada una de ellas seguida por una meseta. El primer crecimiento importante, de 150.000 personas a cinco millones, coincidió con el desarrollo de la manufactura de utensilios. La segunda oleada, de cinco millones a 500 millones, estuvo asociada con la aparición de la agricultura. La tercera, de 500 millones a 5.600 millones, es una consecuencia del auge de la civilización industrial. Cada revolución tecnológica (elaboración de utensilios, agricultura e industria) ha permitido a los seres humanos reducir su dependencia directa de los sistemas naturales.

He estudiado el fenómeno con otros investigadores intentando reconstruir series largas y continuas de ocupación humana para aquellos lugares en los que pudimos correlacionar los datos arqueológicos e históricos. Nuesto propósito inicial era ampliar el registro de ocupación humana para relacionar las fluctuaciones de los procesos naturales, tales como la variación climática o la formación de suelo agrícola, con pautas de actividad humana, de cambio más rápido. Combinando los datos, pudimos reconstruir una secuencia de población a largo plazo para cuatro regiones: el valle del Nilo (6000 años), las tierras bajas del Tigris y el Eufrates, en Irak (6000 años), la cuenca de México (3000 años) y las tierras bajas centrales de México y Guatemala, mayas (2200 años).

Todas estas series de población reconstruidas muestran fluctuaciones periódicas de crecimiento y disminución; en ninguna de ellas la población crece ininterrumpidamente. En todas, salvo en el caso maya, que es el registro más corto, existen 2,5 oleadas evidentes, en las que la población primero se duplica y luego vuelve a reducirse a la mitad con respecto a dicho máximo. Las tasas de variación son modestas en las primeras oleadas y más drásticas en las últimas. Los hundimientos de las civilizaciones, aunque catastróficos para sus individuos, no son súbitos. La segunda ola de decadencia, promediada para las cuatro regiones, dura 500 años, aunque incluye una de las extinciones más precipitadas de la historia humana: las epidemias del siglo XVI entre los pueblos nativos del Nuevo Mundo.

Las fluctuaciones en el bienestar de civilizaciones enteras tienen su reflejo en el de los individuos. Buscando también en este aspecto una amplia perspectiva de la vida humana, he estudiado, junto con varios colegas, la altura humana. Reunimos las estimas de talla realizadas por otros, generalmente a partir de los esqueletos de varones adultos. También consideramos las alturas de personas pertenecientes a poblaciones institucionalizadas. Se suele aceptar que la altura, normalizada por la edad y promediada para una población, refleja el estado nutritivo y sanitario. De esta manera pueden distinguirse las épocas de hambre y de mala salud de las de abundancia y bienestar. Nuestro análisis demuestra que a lo largo de la historia la altura, y es de suponer que el bienestar, han fluctuado. Por poner un ejemplo, un varón adulto de la Bretaña romana era tan alto o más que sus compatriotas de este siglo, pero sus descendientes victorianos eran más bajos. Así pues, las mejoras de la dieta, de la salud y de la subsistencia han seguido direcciones vacilantes y a veces retrógradas.

Estas amplias oleadas de prosperidad y decadencia en determinadas regiones (que hemos denominado oleadas milenarias) plantean diversas cuestiones sobre la vida humana en la Tierra. En el pasado parecía como si los destinos de determinadas zonas se promediasen: algunas se desarrollaban y otras decaían, siendo el saldo conjunto un crecimiento intermitente. ¿Acaso la revolución científico-industrial, y la economía global que ha originado (completada con un sistema de respuesta mundial a las hambrunas), nos han eximido de los fracasos malthusianos del pasado? ¿O quizá determinadas regiones, incluso algunas que son líderes mundiales, pueden venirse abajo en nuestra época?

La civilización moderna ha alterado profundamente el ambiente. La preocupación por sus efectos tiene una historia de al menos un siglo y medio. En 1864 George Perkins Marsh publicó un estudio decisivo: *Man and Nature; or, Physical Geography as Modified by Human Action* (*El hombre y la naturaleza; o geografía física modificada por la acción humana*). Otro posterior, titulado *Man's Role in Changing the Face of the Earth* (*El papel del hombre en la modificación de la faz de la Tierra*), apareció en 1956. El más reciente, *The Earth as Transformed by Human Action* (*La Tierra, transformada por la acción humana*), se publicó en 1990.

Durante siete años de preparación y de ejecución, el Proyecto de la Tierra Transformada reunió a investigadores prominentes de 16 países para documentar el cambio global y regional producido a lo largo de los

últimos 300 años. Pudimos reconstruir modificaciones a escala mundial inducidas por el hombre en trece magnitudes referentes al flujo químico, al uso del suelo y a la diversidad biótica: diversidad de vertebrados terrestres, área deforestada, pérdida de suelo, emisiones de azufre, emisiones de plomo, emisiones de tetracloruro de carbono, poblaciones de mamíferos marinos, desecación de humedales, diversidad floral, emisiones de carbono, emisiones de nitrógeno, emisiones de fósforo y flujos de sedimento.

Aunque el inventario del alcance del impacto humano se centraba especialmente en los últimos 300 años, para situar los cambios actuales en una perspectiva de largo plazo se hizo también una estimación de la influencia humana sobre la Tierra durante los últimos 10.000 años, desde el alba de la agricultura. En este tiempo, los seres humanos han deforestado una superficie neta del tamaño de los Estados Unidos continentales, en su mayor parte para usarla como tierra agrícola. Cada año se retira de la hidrosfera, para uso humano, una cantidad de agua que supera el volumen del lago Hurón. La mitad de los ecosistemas de las tierras libres de hielo de la Tierra han sido modificados, gestionados o utilizados por el hombre. Los flujos de materiales y de energía que en la actualidad se extraen de lugares naturales o que son sintetizados equivalen a los producidos por la misma naturaleza.

Muchas de estas modificaciones son muy recientes, si se tiene en cuenta que, en siete de las trece dimensiones consideradas, la mitad de todo el cambio producido a lo largo de los últimos 10.000 años ocurrió en el período de nuestra propia vida. Ahora se ha puesto de moda vincular estos rápidos cambios ambientales mundiales con riesgos derivados de trastornos políticos, soliéndose atribuir al hambre, a los desastres ambientales o a la escasez de recursos naturales las guerras que acontecen, sobre todo en los países en desarrollo.

Aquí, en la costa de Maine, donde vivo y escribo lejos de estos desastres, me pregunto qué puede ocurrir en el próximo siglo. Tengo muy buenas razones para hacerlo: seis nietos que tendrán entre sesenta y ochenta años hacia el año 2050. Mientras me esfuerzo por imaginar su mundo, el omnipresente océano sugiere una metáfora de cambio en forma de corrientes, mareas y oleaje. Las corrientes son las tendencias a largo plazo, las mareas son los vaivenes cíclicos, y el oleaje, las corrientes de fondo y las corrientes de resaca son las sorpresas.

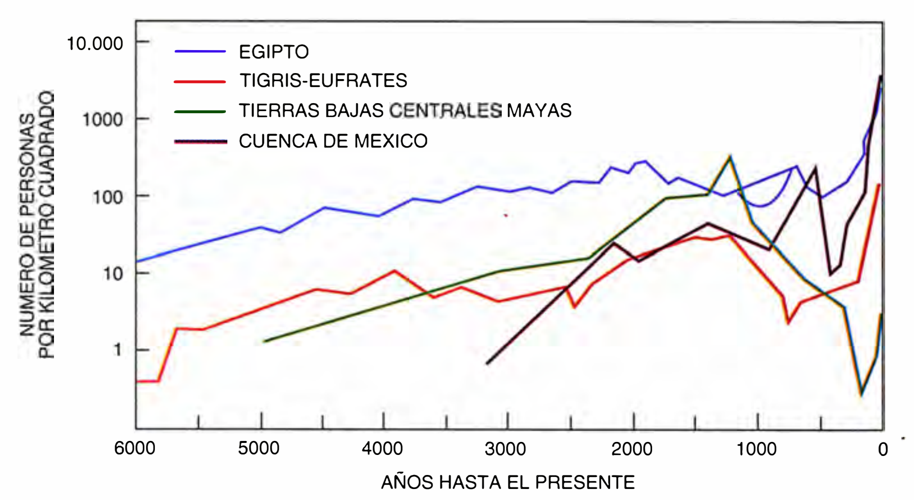
En concreto, creo que el mundo del siglo próximo será más cálido, estará más atestado, será más conexo y también más diverso. Las modificaciones ambientales, el crecimiento demográfico, la interconexión y la diversidad mayores son tendencias poderosas, que corren tan profundas como las corrientes oceánicas, con pocas posibilidades de inversión, aunque claramente sujetas a cambios de ritmo. A menos que exista algún error serio en la ciencia actual, estamos completamente abocados a una Tierra más cálida. La economía planetaria y la disponibilidad generalizada de técnicas de comunicación y de transporte rápidos han vuelto nuestro mundo más conexo. Esta interconexión creciente no tiene por qué homogeneizar a la gente más allá de aficiones superficiales, sino que, paradójicamente, puede aumentar la diversidad de los individuos y de las cosas. Las mercancías, la información y las personas suelen verse atraídas por los lugares que ofrecen riqueza u oportunidades, lo que puede hacer que estas zonas sean más diversas. Y fuertes contracorrientes que destaquen las diferencias étnicas, nacionales y religiosas crearán remolinos y vórtices allí donde corrientes encontradas puedan mezclarse y entrechocar.

Al otro extremo de las corrientes aseguradas están el oleaje, las corrientes de fondo y las de resaca, que derriban nuestras expectativas habituales, dejándonos sólo con la sabiduría de estar a la que salga. Fronteras nacionales que habían parecido inmutables durante decenios han sido barridas en cuestión de meses. La reacción a crisis específicas puede profundizar en nuevas formas de comportamiento e interacción humanos. La expansión de enfermedades tales como el sida puede corroer los cimientos de la sociedad, aumentando las posibilidades de desastres no previstos.

En contraste con las tendencias a largo plazo y con las sorpresas están los ciclos de período corto, o mareas, que se superponen a las grandes corrientes subyacentes. Como ilustraciones del período muy corto, considérense las oscilaciones del ciclo de los negocios, o el fenómeno llamado de El Niño, que afecta al océano Pacífico y sus inmediaciones a intervalos irregulares de años. También existen fluctuaciones cuya duración es de decenios: en las democracias, por ejemplo, los vaivenes a la izquierda o a la derecha del espectro político son recurrentes, al igual que los períodos de expansión y de contracción económica.

Entre tales mareas y tormentas, los seres humanos cuestionan sus posibilidades de supervivencia a largo plazo. ¿Puede seguir duplicándose la población y volver a duplicarse durante la vida de nuestros hijos y de los hijos de nuestros hijos? ¿Habrá bastante comida para alimentar a las masas, bienes materiales suficientes para sus necesidades y deseos, y la energía necesaria para obtener y transformar los productos? Los efectos colaterales de la producción y el uso de energía y de la fabricación y la conformación de materias primas, ¿minarán la salud humana y destruirán los sistemas ecológicos de los que, en último término, depende nuestra especie?

Malthus planteó sin ambages estas preguntas hace 200 años en su *Ensayo sobre el principio de la población* (1798). Puede incluso que sean



3. LOS AVANCES Y RETROCESOS de la densidad de población en cuatro regiones del mundo en tiempos históricos muestran que el número de seres humanos puede fluctuar de manera importante. Todas estas civilizaciones presentan períodos de crecimiento y de decadencia. ¿Es inmune a esta pauta la moderna sociedad industrial?

más antiguas, pues Tertuliano se preguntaba, hace 1800 años, si "la pestilencia y el hambre, las guerras y los terremotos, han de considerarse como remedio para las naciones, como un medio de podar la exuberancia de la raza humana". No hay que sorprenderse de que Malthus, que nació en 1766 y murió en 1834, se preocupara por la suficiencia de los recursos para alimentar a Inglaterra, puesto que vivió en medio de una explosión demográfica. Ahora sabemos que en el decenio de su nacimiento Inglaterra y Gales crecieron un 7 %; en el de la primera edición de su *Ensayo*, un 11 %. Hacia la época de la quinta edición, en 1817, el crecimiento decenal había alcanzado un máximo del 18 %.

Como no es extraño que estas preocupaciones aflorasen de nuevo en el mundo posterior a la segunda guerra mundial. La explosión demográfica de los países en desarrollo se percibió a finales de los años 40 y principios de los 50. En realidad, las mareas de la preocupación científica y pública sobre la población, el alimento, las materias primas, la energía y la contaminación se han agitado, han refluido y han vuelto a ascender durante el último medio siglo, para emerger una vez más en vísperas del nuevo milenio.

Tres son las áreas que veo más claras entre los riesgos que tienen mayores probabilidades de ocurrir, causar más daño o afectar a más gente. La primera es la introducción de contaminantes: lluvia ácida en la atmósfera, metales pesados en los suelos y sustancias químicas en las aguas freáticas. Los seres humanos se enfrentan también a los peligros atmosféricos globales de la lluvia radiactiva, la reducción del ozono estratosférico y el caldeamiento climático debido a los gases de invernadero. Por último, el resultado de la deforestación producida en las tierras tropicales y montañosas y de la desertización en las áridas ha sido un ataque masivo a la biota, que supone la extinción de especies, sobre todo en los trópicos.

El aumento del número de habitantes del planeta se ve acompañado por una marejada en la producción y el consumo de bienes materiales. En 1989, el Instituto Internacional de Análisis de Sistemas Aplicados examinó las proyecciones resultantes de una duplicación de la población realizadas según las "tendencias actuales" y suponiendo que dietas variadas y nutritivas, productos industriales y trabajos regulares han de estar al alcance de la mayor parte de los 10.000 millones de personas. Pues bien, duplicar la población requeriría probablemente cuadruplicar la producción agrícola, sextuplicar el uso de energía y octuplicar el valor de la economía mundial.

Muchos especialistas no consideran verosímil este supuesto del 2-4-6-8 y, desde luego, lo tachan de irrealizable. Piensan que los saberes y las formas de proceder de que disponemos no permiten incrementos de tal magnitud en un ambiente que ya ha experimentado una transformación sustancial de su atmósfera, sus suelos, las aguas subterráneas y la biota. En realidad, para muchos de los jeremías actuales (Lester R. Brown, Paul R. y Anne H. Ehrlich, Donella H. Meadows, Dennis L. Meadows y Jørgen Randers), un mundo de más de 5000 millones de personas ya está superpoblado porque prácticamente todas las naciones están agotando sus recursos o degradando su ambiente. Otros economistas y tecnólogos discrepan [*véase* "¿Habrá alimentos para una población humana creciente?", de John Bongaarts; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, mayo de 1994], pues piensan que la mano invisible de los precios en alza contendrá el consumo y promoverá la conservación y la invención. Confían en que la creatividad humana puede superar todos los límites.

Pero la mayoría de nosotros, si reflexionamos sobre ello, reconocemos la situación excepcional a la que nos enfrentamos. En un período extraordinariamente corto (cuestión de decenas de años) la sociedad tendrá que alimentar, albergar, criar, educar y emplear al menos a tanta gente como la que ya vive en la Tierra. Si en este mundo más cálido y más abarrotado hay que evitar la catástrofe ecológica, sólo podrá hacerse manteniendo grandes desigualdades en el bienestar humano o mediante la adopción de trayectorias muy diferentes para la tecnología y el desarrollo.

¿Qué probabilidades hay de que se produzcan estos cambios de rumbo? Me mueven a un cierto optimismo dos grupos de tendencias que percibo, pero que no acabo de comprender. El primero tiene que ver con modificaciones ya aparentes en las corrientes que nos llevan al futuro. El segundo se refiere a la adaptabilidad humana, en la forma del surgimiento de nuevas instituciones, técnicas y, lo que sin duda es más importante, ideas.

Para ilustrar algunos de los cambios favorables de las corrientes, consideremos la ecuación *IPAT*. Formulada inicialmente por Paul Ehrlich y John P. Holdren, se usa mucho ahora como una expresión simplificada de las fuerzas motoras de las influencias perjudiciales que sobre el ambiente tiene el hombre. El término del impacto *(I)* es función de la población *(P)*, del nivel de afluencia o riqueza *(A)* y de la tecnología disponible *(T)*. De este modo la fórmula engloba la idea generalmente aceptada de que, en la medida en que el ambiente esté en peligro, ello no se debe únicamente al enorme crecimiento de la población (como suele pensarse en

Altura y cambio tecnológico

La altura media, una medida normalizada de bienestar genérico, ha fluctuado a lo largo del tiempo. Los cazadores-recolectores del Mediterráneo oriental alcanzaban una altura de 178 centímetros, gracias a una dieta rica en calorías y proteína. Los primeros agricultores de esta zona llegaban sólo a los 160 centímetros. Comían muchos cereales y padecían el deterioro físico por la difícil labor agrícola. Los agricultores tardíos de Europa alcanzaban los 175 centímetros, probablemente por mejoras en las técnicas agrícolas y de otro tipo. La estatura se redujo de nuevo al comienzo del período industrial europeo, época en que, de promedio, los hombres medían 170 centímetros. Los estadounidenses actuales son un poco más altos.



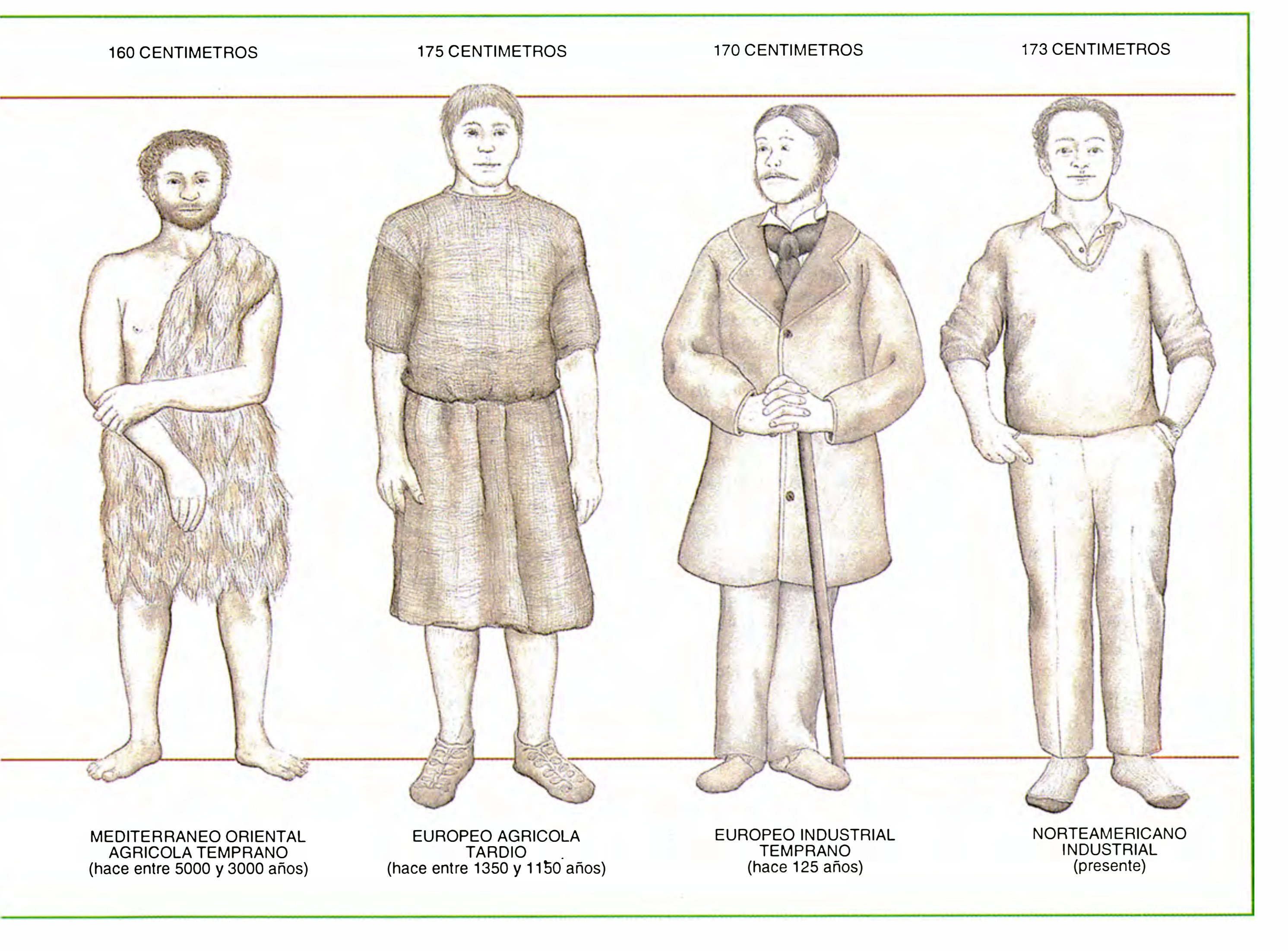
MEDITERRANEO ORIENTAL PREAGRICOLA
(hace entre 30.000 y 9000 años)

los países industrializados), ni sólo al uso rapaz y todavía creciente de energía y materiales por parte de los países ricos (según es opinión común en los países pobres), sino que ambas causas contribuyen de manera importante. Por ejemplo, las estimas de las fuentes de gases de invernadero siguen suponiendo que la mayoría de ellos se originan en los países ricos, pero las naciones en desarrollo contribuirán en la misma medida o más dentro de 20 o 30 años si persisten las tendencias actuales. El término de la tecnología abarca las posibilidades que tienen la ciencia, la técnica y la sociedad para alterar los impactos de un nivel dado de población y de riqueza.

El crecimiento de la población y de la riqueza y la difusión de las tecnologías son corrientes a gran escala que nos impelen hacia el mundo más cálido, más poblado, más conectado y más diverso. Pero ya están actuando contracorrientes para cada una de las variables de la *IPAT*. El crecimiento se está haciendo más lento y se avizoran sus límites. Si consideramos la población y retornamos al concepto de poblaciones cambiantes de Deevey, nos hallamos ahora en la última fase de la tercera de las principales oleadas de población, la consumación de una transición demográfica desde un mundo de elevadas tasas de natalidad y mortalidad a otro de tasas bajas. En Inglaterra se tardó 150 años en completar esta transición, pero en los países en desarrollo está produciéndose con mucha mayor rapidez de lo que se esperaba.

Las tasas de natalidad se han reducido considerablemente desde su máximo de cinco nacimientos por mujer tras la segunda guerra mundial. El paso a 2,1 nacimientos por mujer, requerido para un crecimiento cero de la población, ya está medio dado: la tasa de natalidad actual es de 3,2. La transición a tasas de mortalidad bajas está más avanzada. En los países en desarrollo, la esperanza de vida al nacer era de 40 años al acabar la segunda guerra mundial. Ahora ha aumentado hasta los 65 años, a dos tercios del camino hacia un promedio probable de 75 años, si tomamos como modelo los países desarrollados. La reducción por doquier de la tasa de crecimiento de la población, incluso muy modestamente en Africa, es motivo de esperanza para la continuidad de la vida sobre la Tierra.

El término de riqueza también puede ser autolimitante, según el principio "más rico significa más limpio". El Proyecto de la Tierra Transformada señala que las tasas de aumento para cinco de las 13 transformaciones estudiadas se han reducido en la actualidad: son las extinciones de vertebrados y de mamíferos marinos, así como las emisiones de plomo, de azufre y de tetracloruro de carbono. Todas ellas han sido objeto de enérgicas medidas reguladoras en los países más ricos. Un informe del Banco Mundial de 1992 indica que los problemas ambientales cambian con la riqueza. Los países más pobres se dedican a las necesidades primarias de vivienda e higiene pública, mientras que en los países en desarrollo de renta media los esfuerzos se han dirigido a resolver los problemas de con-





4. LA ALDEA GLOBAL incluye la Samoa americana, cuyos habitantes ven la televisión al borde mismo del Pacífico. La humanidad necesita acomodarse a un mundo más atestado, más cálido y más conexo.

taminación atmosférica y acuática. En los más ricos, el esfuerzo ha pasado del tratamiento de los problemas locales al de los problemas ambientales globales.

Fuerzas económicas y técnicas fomentan el ahorro de materiales y de energía en los procesos industriales y permiten hacer más con menos. Desde mediados del siglo XIX la cantidad de carbono usado por unidad de producción ha ido reduciéndose anualmente en un 1,3 por ciento mediante una combinación del uso de combustibles menos ricos en carbono (0,3 por ciento) y del empleo de menos energía por unidad de producción (1 por ciento). No obstante, estas mejoras no han sido suficientes para contrarrestar el crecimiento anual de la economía del 3 por ciento. Ello ha conducido a un aumento global de las emisiones de dióxido de carbono del 1,7 por ciento anual.

Una tendencia similar, pero más complicada, hacia la ligereza material implica una menor utilización de materias primas por unidad de producción. Se utiliza menos acero y menos cemento, pero más aluminio y más productos químicos (aunque el uso de estos dos últimos ha alcanzado su máximo y está empezando a reducirse). A pesar de las revoluciones de la televisión y del ordenador, el uso de papel permanece constante.

También deberíamos reconsiderar las repercusiones. Los científicos no siempre comprenden los efectos de los cambios inducidos por el hombre en los sistemas naturales básicos de manera que les permita saber si están amenazados ni en qué medida lo están, o qué los sustituye cuando se degradan. Al parecer hay un sesgo en la investigación que estimula la identificación de efectos perniciosos más que la determinación de ciclos de retroalimentación negativos que moderen el daño. Por ejemplo, hay informes recientes que demuestran que la biomasa forestal de Europa no sólo sobrevive, sino que probablemente está aumentando, a pesar de las cargas enormes de contaminantes y de lluvia ácida que recibe. Que tal revitalización pueda ocurrir, quizá por fertilización realizada por los mismos contaminantes químicos, es un aviso. Puede que la naturaleza sea más robusta de lo que la retórica popular esté dispuesta a admitir.

Los optimistas consideran que estas tendencias constituyen buenas noticias, ya que, aunque insuficientes para contrarrestar el crecimiento global de la población o de la economía, apuntan al menos en la dirección correcta. Los pesimistas, por su parte, las ignoran o las consideran insuficientes o demasiado tardías. Sería conveniente que ambas partes comprendiesen las múltiples fuerzas que están en juego, sean o no aparentes, lo que hasta ahora se ha hecho más bien poco. Considérese la tendencia poblacional. ¿Qué fuerzas han ocasionado una reducción de la fertilidad?

Se han realizado muchas investigaciones tratando de estimar la dinámica de la reducción de la natalidad y la contribución relativa que a ella tengan el desarrollo económico y social y los programas de planificación familiar. Diversos estudios, que abarcan la mayoría de los países en desarrollo, indican que el aumento de la tasa de desarrollo está estrechamente asociado con la reducción de la tasa de natalidad, dos tercios de cuya caída explica. Otras investigaciones atribuyen a los programas organizados de planificación familiar entre el 15 y el 20 por ciento en la reducción de la fertilidad. No son muchos los trabajos que hayan tenido en cuenta la cultura y la etnia, pero también son factores importantes, pues el desarrollo socioeconómico y los grandes programas de planificación familiar parecen tener más eficacia en Asia oriental y sudoriental, entre las personas de origen chino y cuando se efectúan en islas pequeñas y abarrotadas o en ciudades-estado.

Aunque, como parece deducirse de estos datos, el desarrollo sea el mejor contraceptivo, no quedan claros sus aspectos relevantes. Los analistas

afirman que reduce la necesidad, o el deseo, de tener más hijos porque muchos de ellos sobreviven y disminuye la necesidad de trabajo infantil, al tiempo que aumenta la de educarlos. El desarrollo también acorta el tiempo disponible para la maternidad y la crianza y crea más oportunidades para que las mujeres consigan una educación y encuentren trabajo asalariado. Finalmente, mejora el acceso a las técnicas de control de natalidad. Quienes proponen programas de actuación suelen destacar uno de estos puntos frente a los otros para justificarlos, pero es evidente que tanto la mayor supervivencia infantil como el cambio en las necesidades laborales, las mejores oportunidades para las mujeres y las posibilidades de control de natalidad son aspectos que se dan conjuntamente en el curso del desarrollo económico.

Comprendemos mal la reducción de la fertilidad, lo mismo que la dinámica del control de la contaminación o de la descarbonización de los combustibles fósiles, si bien no se carece de explicaciones populares y muy simplificadas para cada uno de estos temas. Y, como ocurre en el primer caso, existen dificultades para separar los efectos de cajones de sastre tales como "desarrollo" y "riqueza" de los esfuerzos sistemáticos de la ciencia o de la sociedad.

Los cambios necesarios para mitigar las extraordinarias demandas que hacemos a los sistemas sustentadores de nuestra vida requieren una mejor comprensión de nuestras influencias sobre la Tierra, aunque el mundo no puede esperar y no esperará a que se produzca esta comprensión. Ya sabemos que debemos acelerar las tendencias favorables y detener las destructivas. Una especie capaz de poner en peligro su propia supervivencia también puede luchar por adaptarse a un mundo más cálido, más poblado y más conexo. Ya hay instituciones, técnicas e ideas nuevas que trazan una trayectoria distinta, aquella que la tecnología y el desarrollo de un futuro sostenible pudieran seguir.

Hay tres tipos importantes de instituciones supranacionales incipientes del tipo requerido. Las más conocidas son las oficiales de los países, en forma de un conjunto de organizaciones, tratados y actividades internacionales. En la actualidad hay unos 170 tratados vigentes centrados en el medio ambiente. Nuevas instituciones internacionales, como la Comisión para el Desarrollo Sostenible de las Naciones Unidas, supervisarán los acuerdos de la Cumbre de la Tierra de 1992 en Río de Janeiro. El Servicio Ambiental Global combina los talentos y los fondos del Banco Mundial y de los Programas de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) y para el Medio Ambiente (PNUMA). También son conocidas las empresas multinacionales, aunque por lo general no por su dimensión ambiental. Tales empresas son responsables de muchos de los cambios inducidos por el hombre en todo el globo, pero también, y de manera creciente, diseminan enfoques comunes, recursos técnicos y normas para enfrentarse a los problemas ambientales. Menos conocida, pero en muchos aspectos más importante, es, por último, la verdadera explosión de organizaciones no gubernamentales transnacionales, privadas y de voluntariado, centradas en el ambiente y el desarrollo, junto con sus homólogas locales en los países en desarrollo; se estima que son unos 200.000 grupos, cada vez más interconectados en redes internacionales.

El nuevo campo de estudio y de actuación conocido como ecología industrial pretende utilizar los mecanismos de la competencia y de la eficacia mercantiles para minimizar las cantidades de energía, materias primas y desperdicios en juego. Más remota se encuentra la solución a la necesidad sustancial de aumentar el sustento humano sin incrementar las cargas ambientales, objetivo que puede conseguirse mediante la ciencia y la ingeniería de los procesos biológicos, el desarrollo de nuevas fuentes de energía y de técnicas de distribución, la creación de materias primas y, eventualmente, la sustitución de energía y materiales por información. La biotecnología promete cosechas que precisarán menos fertilizantes y menos plaguicidas. Los investigadores del mundo en miniatura de la nanotecnología y la microelectrónica esperan desarrollar máquinas y procesos que ocuparán menos volumen y generarán menos desechos.

Más importancia potencial que las nuevas instituciones o la nueva tecnología tienen las nuevas ideas, combinadas con una preocupación creciente por el ambiente. El mantenimiento de la vida humana sobre la Tierra requiere al menos de tres grupos cruciales de ellas, a saber, la idea de que es necesario convivir con el mundo natural; la de que existen límites a la actividad humana; y la de que los resultados de tal actividad han de ser compartidos de manera más general.

Un estudio realizado en 1993 por Riley E. Dunlap y la organización Gallup comparaba la opinión que sobre temas ambientales tenían los ciudadanos de doce naciones industriales y otras doce en desarrollo (incluyendo Europa oriental). El resultado sorprendente es que hay muy poca diferencia en sus actitudes, hasta el punto de llegar a considerar que las causas de los problemas existentes son por igual la "superpoblación" y el "consumo de los recursos mundiales por las naciones industrializadas". Junto a estas muestras de generalización de la preocupación ambiental están surgiendo otras ideas más profundas. Sirvan como prueba de ello la oposición radical al antropocentrismo, los esfuerzos más modestos por resolver las exigencias contrapuestas de los ecosistemas y las economías o las demandas de equidad entre especies, lugares, pueblos, medios de vida y generaciones.

Hace quince años, Lionel Tiger, de la Universidad Rutgers, sugirió que existe una "biología de la esperanza", una inclinación evolutiva de la especie humana hacia el optimismo, que compensa en parte nuestra tendencia a plantear cuestiones difíciles del tipo de "¿Puede continuar la vida humana en la Tierra?". Aunque sus argumentos, más bien tenues, no acaban de convencerme, comparto su idea. Y no porque tenga yo una excesiva confianza en la mano invisible del mercado, ni en el cambio tecnológico, ni siquiera en el principio de Gaia, de James E. Lovelock, según el cual la misma vida parece crear las condiciones para su propia supervivencia. Tampoco es la sagacidad y la energía de que hacen gala mis nietos y todos los demás niños del mundo. Más bien es porque la esperanza es una pura condición de supervivencia de nuestra especie, consciente ahora del improbable y extraordinario viaje que ha emprendido la vida en el universo.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

THE EARTH AS TRANSFORMED BY HUMAN ACTION: GLOBAL AND REGIONAL CHANGES IN THE BIOSPHERE OVER THE PAST 300 YEARS. Dirigido por B. L. Turner II, William C. Clark, Robert W. Kates, John F. Richards, Jessica T. Matthews y William B. Meyer. Cambridge University Press, 1990.

MÁS ALLÁ DE LOS LÍMITES DEL CRECIMIENTO. D. H. Meadows, D. L. Meadows y J. Randers. El País/Aguilar, 1992.

TECHNOLOGICAL TRAJECTORIES AND THE HUMAN ENVIRONMENT. Dirigido por Jesse H. Ausubel y H. Dale Langford. National Academy Press, 1994.

Ciencia y empresa

Detección de averías

En ferrocarriles

Dentro del vasto campo del control de procesos, revisten especial interés los sistemas de detección y diagnóstico de averías en ferrocarriles, ya que cada vez son más importantes para mejorar el rendimiento y reducir los costes de mantenimiento. El coste directo de una reparación (mano de obra, recambios, etcétera) suele ser pequeño. No así los costes indirectos: parada del proceso, pérdida de producción e incumplimiento de plazos, por ejemplo, que son además difíciles de evaluar.

A la hora de calcular el coste indirecto, hemos de atender al tiempo que se tarda en detectar y localizar una avería. Este factor guarda relación con la posibilidad de medida de las variables en el momento de la avería, aislamiento de las causas y las consecuencias que puede llevar consigo un pequeño fallo, etcétera. A nadie se le escapa que la detección pronta de una avería disminuye el coste indirecto.

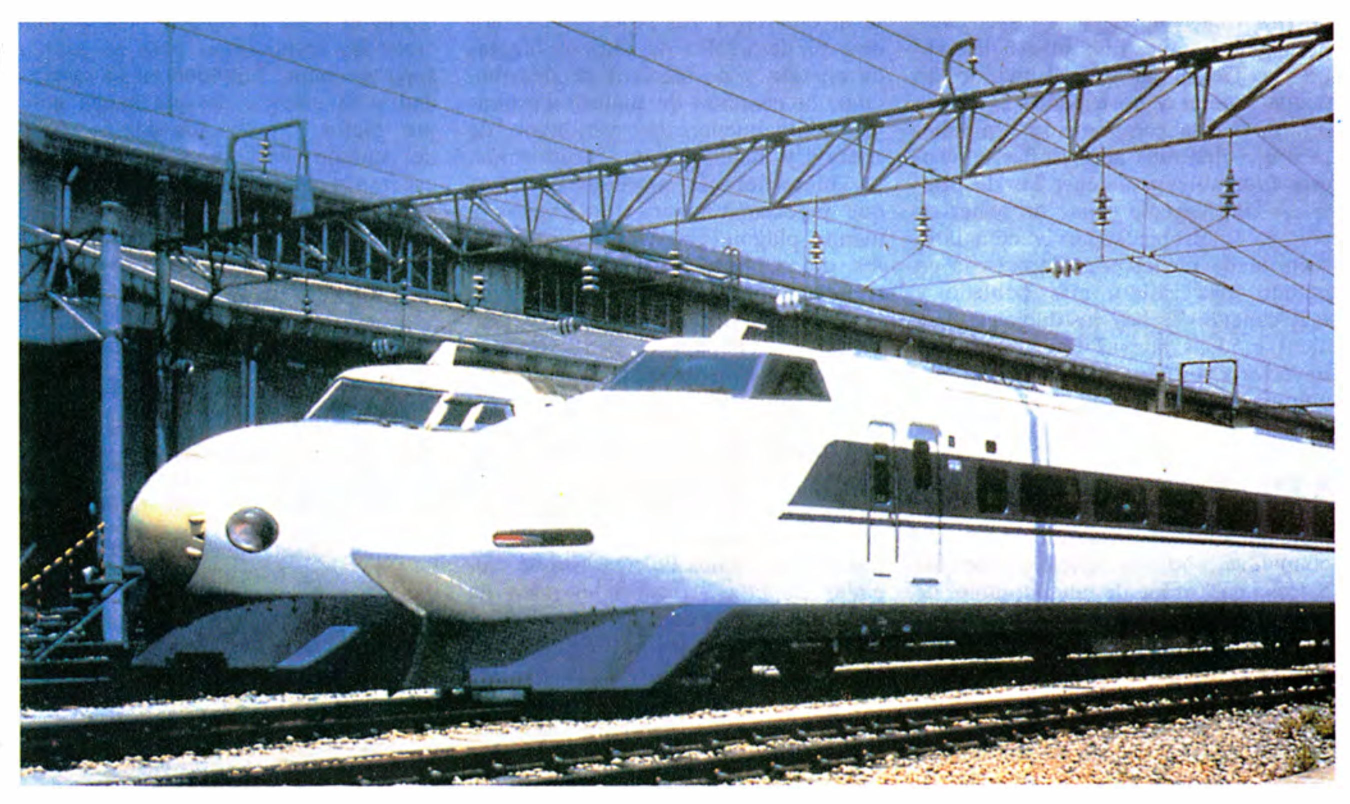
Los sistemas expertos, basados en el conocimiento, permiten incorporar la experiencia de personal cualificado en los procesos de descubrimiento y diagnóstico de fallos. De ahí su papel de ayuda al mantenimiento y reparación. Además, un sistema experto asegura la perennidad de la información, recogiendo la experiencia del avezado para utilizarla y trasmitirla a los principiantes. Si a esto añadimos la facilidad con que podemos adaptar y poner al día un sistema, nos daremos pronta cuenta del avance que suponen sobre los métodos clásicos.

Por otro lado, los sistemas complejos, el ferrocarril entre ellos, contienen elementos de potencia —tiristores, triacs— y demandan prestaciones de muy alta velocidad, puesto que los tiempos de respuesta son del orden de milisegundos.

Los modernos sistemas de control de averías en ferrocarriles se basan en sistemas expertos desarrollados en programas informáticos. Pero se trata de una configuración incapaz de operar en tiempo real. En un diseño tradicional, la velocidad está condicionada por su estructura secuencial, que no permite paralelismo, y por el gran volumen de datos que hay que manejar.

Fijémonos, por ejemplo, en el proceso de detección de averías de un ferrocarril, con exclusión de los ciclos de redundancia y de diagnóstico. Si en él se definen, pongamos por caso, 500 averías, con una profundidad media de 12 reglas por avería, deberán procesarse 6000 reglas por ciclo de detección. Si a esto se añade que cada regla puede requerir un mínimo de 5 operaciones distintas, y considerando un ciclo de detección de 1 milisegundo (suficiente para los elementos de potencia), resulta que han de realizarse 30 millones de operaciones por segundo. Gracias a la mejora de la velocidad de los procesadores, una arquitectura Von-Newman al uso —las que emplean los computadores personales— permite realizar este proceso con gran velocidad. Pero no basta, cuando se trata de trabajar en tiempo real, para aplicaciones complejas, con gran volumen de información y con requerimientos de alta velocidad.

Sí podemos realizar en tiempo real el proceso de detección de averías por medio de un sistema experto a través del tratamiento en soporte físico ("hardware"), es decir, creando un procesador dedicado a esta función exclusiva, con una arquitectura idónea para estas especificaciones.



Este prototipo consigue la detección de averías en tiempo real

El paso más difícil consiste en conseguir que el experto explicite sus conocimientos y experiencia. La heurística nos permite simplificar el dominio de conocimientos. Podemos entonces definir las distintas averías como un conjunto de reglas o cadena de condiciones. Para determinar una secuencia de detección de averías, utilizaremos patrones, que no son otra cosa que conjuntos de condiciones que deben cumplir las señales. Cada condición está formada por comparaciones de tipo binario (accionamiento de mecanismos) o de tipo analógico (tensiones, frecuencias y otros parámetros similares).

Por ejemplo, el experto puede definir la siguiente avería formada por dos condiciones: "Si la puerta está abierta y si la velocidad es mayor que 5 km por hora, entonces hay avería en el cierre de las puertas".

Cada condición por sí sola no representa ninguna anomalía. El sistema detecta una determinada avería cuando, después de verificar el cumplimiento de cada una de las condiciones que definen la avería, comprueba la existencia de un determinado patrón.

Un sistema de detección de averías en un ferrocarril consta de tres fases: adquisición de datos sobre el estado del ferrocarril, tratamiento (detección y diagnóstico de la información recibida del módulo de adquisición) y actuación sobre el proceso.

Mediante distintos sistemas de adquisición y extracción de características se puede disponer de los valores actualizados de las variables que intervienen en el proceso a muy alta velocidad. Gracias a un sistema de comunicaciones que actualiza la información de los sensores, al almacenamiento de los valores en una memoria de datos y a la utilización de memorias de doble puerto, se puede considerar que el tiempo de adquisición no influye en el proceso de toma de decisiones. Por esta razón, nos centraremos exclusivamente en el tratamiento de la información que procede de este módulo de adquisición.

En cuanto a la tercera fase, las actuaciones que se siguen del proceso pueden alcanzar tres niveles: *a*) la simple presentación de los datos e incidencias en un monitor, que sirve al operador humano para facilitar su actuación sobre el sistema y advertir de las repercusiones e importancia del suceso o avería. *b*) El almacenamiento del estado de las señales en el entorno temporal de un suceso, que permite la determinación posterior de las causas y consecuencias de dicho suceso, facilitando el trabajo de reparación y posibilitando el mantenimiento predictivo. *c*) Por último, las actuaciones automáticas que posibiliten un funcionamiento semiautomático o supervisado del sistema.

El sistema experto de tratamiento de señales está formado por la base de hechos, una base de conocimientos estática y un motor de inferencia. La de hechos es una base de conocimientos dinámica o memoria temporal que almacena los valores actualizados de las distintas variables que definen el estado del ferrocarril en cada momento; la base de conocimientos estática, o memoria patrón, contiene la experiencia y conocimientos del experto; por fin, el motor de inferencia es un procesador que compara los valores almacenados en la memoria patrón con los valores actuales de las variables que se contienen en la memoria temporal.

El motor de inferencia sólo debe ejecutar instrucciones del tipo "Si..., entonces..." Por ello, basta con definir dos tipos de instrucciones para el motor de inferencias según que la comparación que se vaya a ejecutar sea de variables binarias o analógicas. Por ello, cada instrucción debe contener los dos datos —el patrón y el temporal— y el tipo de comparación que se va a realizar.

El procesador encargado de llevar a cabo estas secuencias se parece a un microprocesador dotado de un solo tipo de instrucción. Por eso, su funcionamiento siempre es el mismo, y la instrucción aporta exclusivamente los datos y la forma de trabajo de la unidad lógica. La unidad lógica debe interpretar las distintas instrucciones mediante un comparador de magnitud o un comparador lógico para determinar si se cumplen las condiciones de las señales analógicas o binarias, respectivamente.

La ejecución de las instrucciones se puede descomponer en cinco operaciones elementales. La segmentación facilita el procesamiento paralelo, mediante un doble bus completo de datos y direcciones, para la memoria de programa y para la memoria de datos temporal. En cada ciclo de reloj, se pueden realizar hasta cinco operaciones elementales correspondientes a instrucciones consecutivas y ejecutarse una instrucción. Con ello, se pueden ejecutar hasta 30 millones de instrucciones por segundo, con reloj del sistema de 30 megahertz.

Tal arquitectura admite ulterior refinamiento, puesto que solemos encontrar condiciones repetidas en averías distintas. El hecho de evaluar una sola vez cada condición lleva a mejorar, de manera sustancial, la velocidad del procesamiento de la información. En un proceso relativamente complejo como es la monitorización de un ferrocarril puede llegar a multiplicar por diez la velocidad del proceso anterior. Esta arquitectura se ha denominado en árbol y no conlleva un aumento particular del soporte físico.

Hemos sometido a contrastación las arquitecturas descritas en unidades móviles ferroviarias de Eusko Trenbideak/Ferrocarriles Vascos (ET/FV). Los expertos de la empresa realizaron una descripción de 500 averías, con un promedio de 10 reglas por avería. El tiempo de detección de fallos conseguido ha sido de 1 milisegundo, para el examen de todas las cadenas de condiciones mediante la arquitectura en línea con segmentación. Empleando la arquitectura en árbol, se realiza el examen de las condiciones de las averías en 100 microsegundos, todo ello con un reloj del sistema relativamente lento, de 10 megahertz.

No encierra especial dificultad la realización de estas arquitecturas en dispositivos lógicos programables, lo que representa un bajo coste, al tiempo que sirve de potente acelerador a incorporar en sistemas más complejos.

MIGUEL RODRÍGUEZ Y
GERARDO ARANGUREN ARAMENDÍA
Universidad del País Vasco

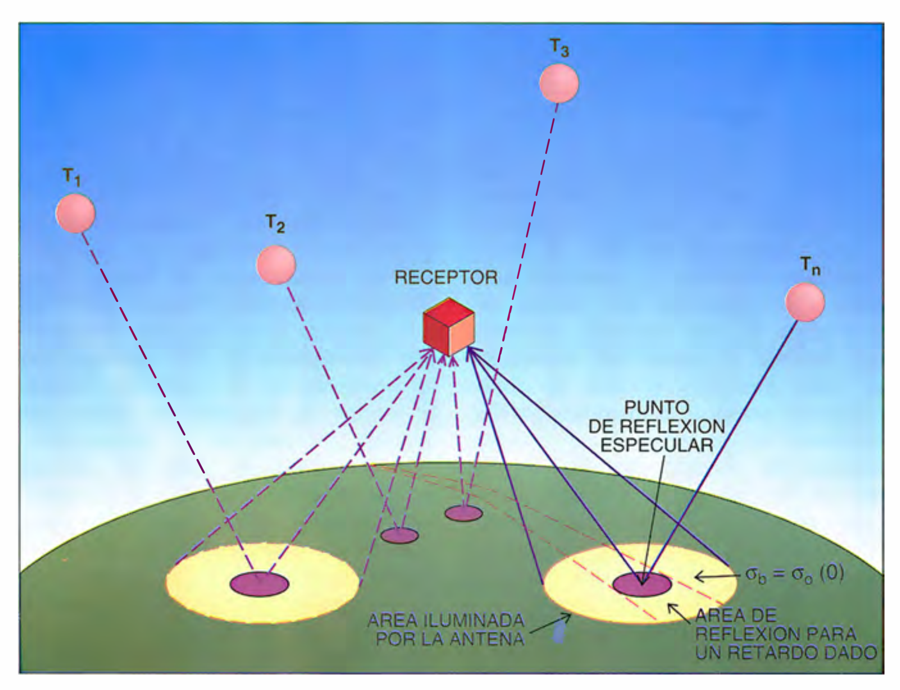
Altimetría oceánica

Sistema PARIS

La altimetría oceánica se ocupa de medir la "altura" o distancia de la superficie del océano respecto de una superficie de referencia, o elipsoide terrestre. A la formación del relieve oceánico contribuyen diferentes factores, que son importantes en gravimetría y climatología. Tales factores van desde el campo gravitatorio terrestre que define el geoide, o superficie media del océano, con variaciones incluso de unos pocos centímetros, hasta el viento que produce ondulaciones locales, que pueden sobrepasar la decena de metros.

Además del relieve del océano se puede estimar, atendiendo a modelos hidráulicos, la magnitud de las corrientes, otro parámetro básico en climatología.

Hasta la fecha, los altímetros lanzados a bordo de satélite, como el del ERS-1 (*Satélite Terrestre de Sensor Remoto 1*), son radares de microondas que miden con gran precisión la distancia desde el satélite hasta su proyección vertical sobre la superficie del océano. Este tipo de



Sistema PARIS *aplicado a las señales GPS: el altímetro consta de un receptor con dos entradas conectadas a dos antenas, una apuntando al cénit y la otra al nadir. El receptor correla las dos señales de entrada que contiene las señales directas y sus ecos correspondientes a los satélites GPS T1, T2, ...Tn. De las demoras medidas se deduce la altura del océano en las áreas de reflexión "a"*

medición facilita la observación de rasgos permanentes o medios, como la forma del geoide; no sirve, sin embargo, para registrar los cambios más rápidos que suceden a escalas medias (unos pocos cientos de kilómetros) en la superficie del océano. Para medir fenómenos de escala media es necesario realizar mediciones altimétricas simultáneas sobre puntos que disten entre sí, como mucho, 50 kilómetros con una frecuencia mayor que 7 días. Para satisfacer tales requisitos, necesitamos una constelación de unos 8 satélites de órbita baja, cada uno equipado con un altímetro, lo que representa un coste muy elevado.

En la Agencia Espacial Europea trabajamos en la elaboración de un método alternativo. Me refiero al uso de "señales de oportunidad". El prototipo, denominado *PARIS* ("Sistema de Interferometría y Reflectometría Pasivo"), consiste en medir la demora sufrida entre un conjunto de señales de oportunidad recibidas directamente y sus ecos en los puntos correspondientes del océano. El altímetro queda así reducido a un receptor doble, en principio con un coste inferior al de un sensor convencional, pues no necesita ningún transmisor. A cambio, las características de las señales de oportunidad, en particular la potencia, el ancho de banda y la zona de cobertura, vienen impuestas por los transmisores que las generan. Los transmisores pueden pertenecer a un sistema totalmente independiente.

Se pretende estudiar la aplicación del modelo *PARIS* a dos casos concretos: las señales GPS ("Sistema de Posicionamiento Global") y la constelación de satélites de órbita baja. En el primer caso, las señales de oportunidad son las señales GPS; en el segundo, las señales transmitidas por un satélite se convierten en señales de oportunidad para los dos satélites adyacentes, con lo que el número total de satélites necesario se reduce a la mitad, es decir, 4 en lugar de 8.

Las señales del sistema GPS ofrecen varias características que las hacen atractivas para utilizarlas en altimetría oceánica. Las generan un conjunto de 21 satélites nominales a unos 20.000 km de altura, de los que alrededor de 8 son visibles en cualquier momento desde un satélite de órbita baja, lo que permitiría realizar, simultáneamente y con un ángulo de incidencia adecuado, mediciones altimétricas sobre al menos 5 puntos del océano. El sistema transmite en banda L (longitud de onda alrededor de 20 cm) dos portadoras ligeramente separadas en frecuencia, hecho que se utilizaría para compensar los efectos de la refracción atmosférica en las medidas de altura. Estas señales están moduladas en fase con dos tipos de códigos pseudoaleatorios, de los que se usaría solamente el de precisión o código P.

Dicho tipo de modulación permite la "compresión" en rango mediante la correlación de la señal directa y la reflejada, proceso por el cual se pueden aislar los ecos que corresponden a diferentes porciones de la superficie del océano. La medida altimétrica estaría asociada, en el caso citado, a una extensión de aproximadamente 200 km cuadrados alrededor de cada uno de los puntos de reflexión especular. Debido al movimiento relativo de los satélites GPS y el altímetro, las áreas de medida se convierten en bandas que muestrearían la superficie del océano de modo no uniforme. Por contra, las señales GPS están limitadas en banda a 10 megahertz, lo que reduce la exactitud potencial de las mediciones altimétricas.

1
2
h =1334 Km
(ALTURA ORBITAL)
α = 4,4 grados
(ANCHO DE HAZ
DE ANTENA
EN LA DIRECCION
TRANSVERSAL
AL PLANO ORBITAL)
ANCHO DE HAZ
DE ANTENA
R1
R2
R1+R2 = constante
a = 2-7 Km
(AREA DE REFLEXION
PARA UN RETARDO DADO)
s = 50 Km
(SEPARACION ENTRE PISTAS)

Sistema PARIS *aplicado a una constelación de altímetros: los satélites 1 y 2 llevan sendos altímetros y describen órbitas casi paralelas. Los pulsos del satélite 1 se reflejan en el punto medio de la superficie del océano entre proyecciones y llegan al satélite 2. Lo mismo ocurre a los pulsos transmitidos por 2, que son recibidos en 1. Con la debida sincronización cada satélite puede procesar su eco propio y el del otro satélite, ahorrándose el satélite que debería medir la altura del océano en el punto medio*

Para el caso de la constelación de 8 satélites, y suponiendo que viajan en órbitas casi paralelas (líneas nodales de planos orbitales equiespaciadas angularmente), la señal transmitida por uno de ellos, digamos el 3, se refleja en las proyecciones del 2 y del 4 sobre el océano y llega hasta el 1 y 5, respectivamente, convirtiéndose en una señal de oportunidad respecto de ellos dos. Si estos ecos de oportunidad en los satélites 1 y 5 debidas al 3 se procesan, los satélites 2 y 4 dejan de ser necesarios. Las señales de oportunidad tienen en este caso todas las características deseadas, pues son generadas por un altímetro.

Para que el modelo *PARIS* funcionase en esta segunda configuración, los 4 satélites que compusieran la constelación deberían tener unos diagramas de antena ensanchados para permitir la recepción de los ecos de los otros satélites, unos tiempos de transmisión y recepción de pulsos sincronizados, amén de unos receptores capaces de procesar tres ecos: el propio y los dos correspondientes a los satélites adyacentes, con separación entre las señales tanto frecuencial como temporal. Este sistema reducido podría ponerse en órbita con un solo lanzamiento múltiple.

No está claro que en el primer caso de las señales GPS se alcance la precisión de 1 centímetro requerida por la comunidad científica, debido a la limitación del ancho de banda. Por su parte, en el segundo caso de la constelación se trata de averiguar si la reducción del número de satélites y la mayor complejidad asociada a cada uno de los altímetros restantes resulta finalmente en un coste total neto menor que el de la constelación inicial. (El autor agradece el apoyo recibido de M. Lopriore, C. Martín-Rodríguez y T. Feliu.)

M. Martín-Neira
Agencia Espacial Europea,
Noordwijk, Holanda

Una nueva visión

Para los cirujanos

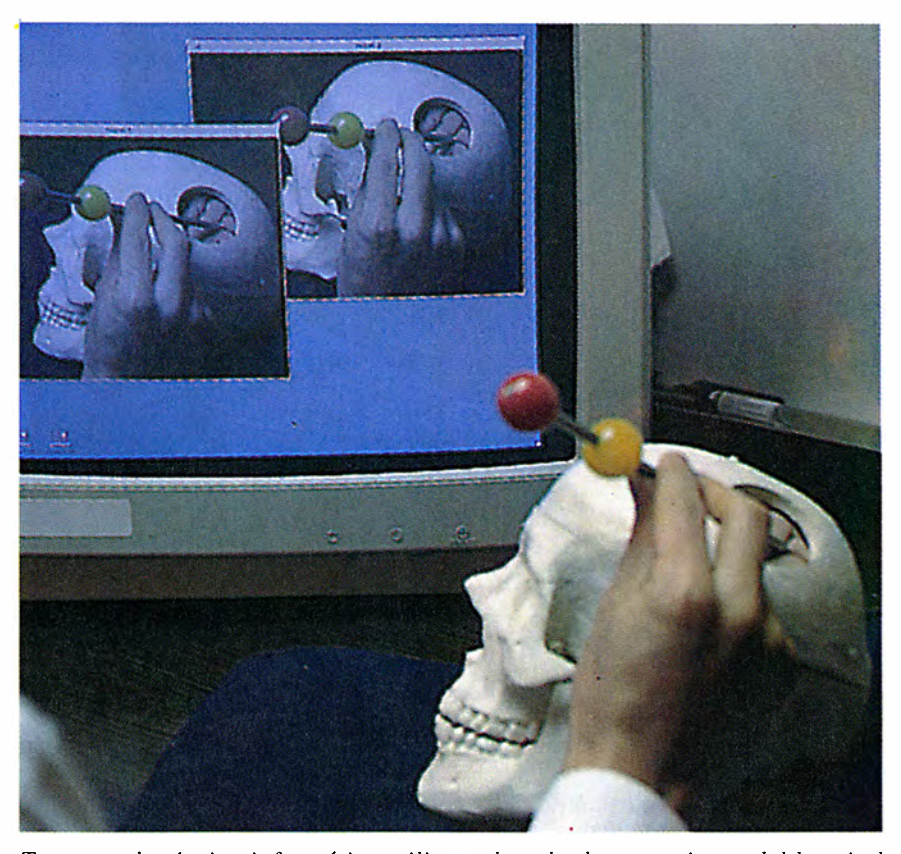
De nada sirven, para la mayoría de los ciudadanos, las gafas de visión nocturna o la dirección de tiro por láser. Y como ésos, cien avances más en la industria de defensa. Pero ya no podemos generalizar. Se trabaja en un proyecto en el que las refinadas técnicas militares de construcción de imágenes hallarán aplicación civil. Médicos y pacientes serán sus beneficiarios directos.

La Fundación Clínica de Cleveland y la Fuerza Aérea de los EE.UU. están desarrollando un sistema que podría proporcionar a los cirujanos una imagen tridimensional, en tiempo real y transparente del campo operatorio. Se salvarían así pacientes sometidos a intervenciones delicadísimas. El equipo encabezado por Gene Barnett ha conseguido ya una versión de imagen fija del aparato para facilitar la cirugía cerebral. Antes de la operación, se crea una imagen del cerebro en un superordenador, combinando los resultados de tres técnicas conocidas: creación de imagen por resonancia magnética, tomografía informatizada de rayos X y angiografía de substracción digital. Durante la operación, el ordenador vigila la posición de los instrumentos quirúrgicos. Mide, en efecto, el tiempo que tardan cortos trenes de ultrasonidos en llegar desde diminutos "faros" montados en los instrumentos hasta unos micrófonos cercanos. El ordenador, que "conoce" las formas de los instrumentos, superpone imágenes móviles de éstos sobre la representación del cerebro. El cirujano dispone en pantalla de ese resultado integrado.

De momento no puede usarse todavía ese aparato en otras zonas corporales. Por razones obvias: la respiración altera la posición de los tejidos, lo que significa que una imagen fija obtenida antes de la operación pierde su validez. Pero es entonces cuando entra en escena James D. Leonard, militar experto en la "fusión de sensores" o arte de combinar las imágenes generadas por diferentes instrumentos. Leonard espera añadir la exploración ultrasonora al ingenio creado por Barnett. La técnica proporcionaría una imagen en tiempo real del campo operatorio que reflejaría los movimientos de los tejidos. Lo más difícil, sin embargo, es lograr que los datos de la exploración ultrasónica sirvan para "deformar" la imagen de alta resolución almacenada en el ordenador, adaptándola a la forma real del tejido en ese momento.

El equipo de imagen fija se vale de una pantalla de televisión. Leonard se propone también vencer esta limitación, y experimentar con pantallas montadas en el casco, semejantes a las usadas por los pilotos de caza. La imagen creada por el ordenador se proyectaría dentro del yelmo, de modo que el cirujano no tendría que apartar la vista del campo operatorio para observar la imagen.

Tim Beardsley



Trasvase de técnica informática militar a la sala de operaciones del hospital

John Iovine

Fabricación de una neurona electrónica

Las redes neuronales artificiales son sistemas electrónicos que operan y aprenden siguiendo el modelo del cerebro. Funcionan en computadoras en forma de programas, coprocesadores o sistemas operativos. Los expertos confían en que, imitando las innúmeras interconexiones de las neuronas, podrán recrear el modo en que el cerebro aprende, almacena el conocimiento y reacciona a distintas lesiones. Estos circuitos podrían algún día constituir la base de unas futuras máquinas inteligentes. Quizá logren también salvar los obstáculos a los que se enfrentan los programas informáticos en uso, incapaces de ejecutar en tiempo real algunas tareas que la mente humana tiene por elementales: reconocimiento del habla e identificación de imágenes.

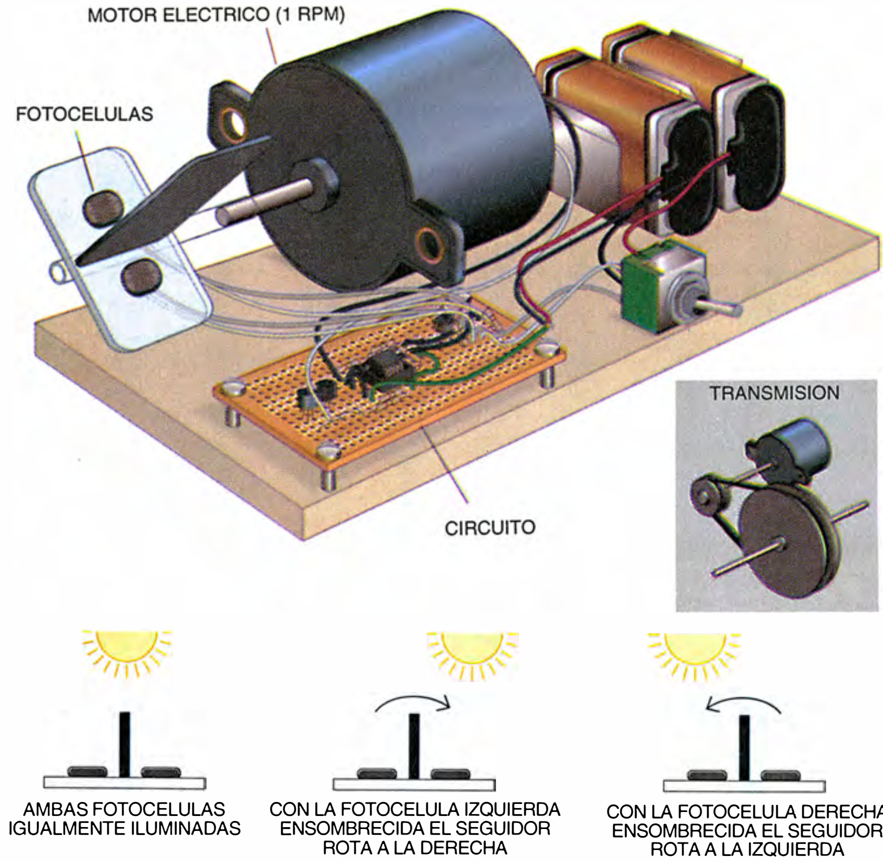
En una red neuronal artificial, los objetos llamados unidades representan los cuerpos de las neuronas. Esas unidades están conectadas mediante enlaces, sustitutos de dendritas y axones. Los enlaces ajustan la intensidad de la salida de las unidades, imitando las distintas intensidades de las conexiones entre sinapsis, y transmiten la señal a las otras unidades. Cada una de éstas, al igual que una neurona real, se activa sólo si todas las señales de entrada que le llegan sobrepasan cierto valor umbral.

La ventaja fundamental de esta arquitectura reside en que la red es capaz de aprender. En concreto, es capaz de ajustar la intensidad, o coeficiente de ponderación (el "peso"), de los enlaces entre unidades. Actuando así, los enlaces modifican la salida de una unidad antes de cebar la señal de la unidad siguiente. Unos enlaces se refuerzan y otros se debilitan. Para hacer que una red aprenda, los investigadores presentan al programa los patrones de entrenamiento, que modifican el peso de los enlaces. El programa altera la pauta de activación de la red.

Aquí voy a describir la construcción de una red neuronal en forma de circuito eléctrico. Este, gracias a un motor eléctrico, sigue el movimiento de una fuente luminosa (solar, por ejemplo).

El funcionamiento del circuito es sencillo, pues se basa en una sola neurona, representada por un amplificador operacional de tipo 741, que es un circuito integrado muy usado. Compruébese de entrada que el amplificador está acompañado del correspondiente diagrama de patillas, en el que se identifican con números los puntos de conexión.

De sensores neuronales actúan dos fotocélulas de sulfuro de cadmio que proporcionan la señal de entrada al amplificador. La resistencia de estos componentes, cuyo tamaño es el de la punta de un meñique, varía proporcionalmente a la intensidad de la luz. Con epoxia o pegamento de caucho, pegue las fotocélulas a una placa de plástico delgada, de unos tres centímetros de ancho por cinco de largo. Los sensores colóquelos separados un par de centímetros. Intercale, entre ambos, una pieza de plástico similar, de suerte que el conjunto



1. Una red neuronal de cables eléctricos sigue el movimiento del Sol merced a dos fotosensores igualmente iluminados. Un motor eléctrico que funcione más deprisa podría necesitar acoplarse a un engranaje de mayor tamaño

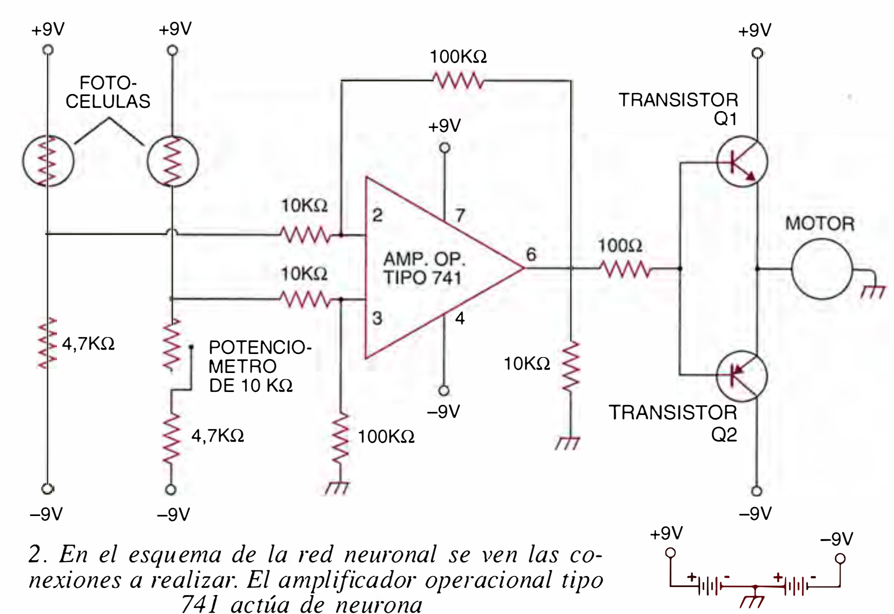
Componentes electrónicos

- Un amplificador operacional tipo 741
- Un potenciómetro de 10 kilo-ohms
- Una resistencia de 100 ohms
- Dos resistencias de 4,7 kilo-ohms
- Tres resistencias de 10 kilo-ohms
- Dos resistencias de 100 kilo-ohms
- Dos fotocélulas de sulfuro de cadmio
- Un transistor NPN (Q1)
- Un transistor PNP (Q2)

adquiera el aspecto de una T invertida. Esa pieza debe ser opaca.

El resto del circuito debe construirse sobre una superficie inmóvil situada a unos pocos centímetros de los fotosensores. Una placa base (una lámina de plástico perforada donde se sujetan los componentes electrónicos) ayudará al buen orden y claridad de las conexiones.

Necesitará también una fuente de alimentación; le servirá un par de pilas de nueve volts. Conecte ambas pilas uniendo el borne positivo de una al borne negativo de la otra (en realidad, poniéndolas a tierra). Esta configuración deja abierto un borne en cada pila, con lo que se consigue una fuente de alimentación bipolar. Hay cuatro componentes que consumen energía eléctrica: las dos fotocélulas, el amplificador y el motor. Conéctense en paralelo los cuatro a las pilas. Por comodidad, podría intercalar un interruptor.



2. En el esquema de la red neuronal se ven las conexiones a realizar. El amplificador operacional tipo 741 actúa de neurona

Observará que en el esquema se dibujan varias resistencias. Su misión es estabilizar la intensidad de la corriente que atraviesa el circuito. A una de las fotocélulas hay conectado un potenciómetro (esencialmente, una resistencia variable) de 10 kilo-ohm. Este componente regula la tensión eléctrica que recibe el amplificador: ajusta el peso del enlace.

Interconecte los fotosensores de manera que queden unidos a las patillas 2 y 3 del amplificador. La fuente de alimentación va a las patillas 4 y 7. La señal de salida abandona el amplificador por la patilla 6 y va a parar a dos transistores. Uno de éstos, rotulado Q1, es del tipo NPN; el otro, Q2, es del tipo PNP. Estos transistores activan el motor y, en cierto sentido, pueden considerarse neuronas motrices artificiales.

El motor eléctrico es de corriente continua y baja tensión. El que yo utilicé era de 12 volts y una revolución por minuto (RPM). Si las RPM de su motor son excesivas, tendrá que acoplarle un engranaje de más diámetro para reducir la velocidad. Debe tener un árbol de unos seis centímetros de largo. Para alargar el árbol de mi motor le coloqué un tubo de plástico rígido en el extremo.

Para entrenar al circuito, exponga ambas fotocélulas a iguales intensidades luminosas. Para ello debe bastar con una lámpara situada directamente encima de los sensores. Luego se ajusta el potenciómetro hasta que el motor se para. Este proceso altera el peso de la señal, de tal modo que, cuando ambos fotosensores reciben la misma iluminación, el amplificador operacional no genera tensión eléctrica. Bajo condiciones de iluminación desigual, la salida del amplificador ofrece una tensión positiva (activando el transistor NPN) o una negativa (disparando el transistor PNP). El transistor que en cada caso se active dependerá de qué sensor reciba la menor cantidad de luz.

Para comprobar el circuito, cubra una de las fotocélulas; el motor, entonces, deberá ponerse a girar y pararse cuando retire el embozo. Tape después la otra fotocélula; con ello el motor girará en el otro sentido.

A continuación pegue el montaje de los fotosensores al árbol del motor de suerte que las fotocélulas queden hacia arriba. Ilumine los sensores oblicuamente. Si el motor rota en el sentido indebido (o sea, alejándose de la luz), invierta los cables de alimentación del motor. Puede que tenga que atenuar la luz que llegue a las fotocélulas; el Sol es una fuente tan intensa, que fácilmente saturará los sensores. Cubra bien las fotocélulas con un trozo de plástico de color translúcido.

En tanto el Sol se mantenga centrado con respecto a las dos fotocélulas, exponiéndolas a la misma intensidad luminosa, las entradas a la neurona se equilibrarán. Conforme el Sol se desplaza por el firmamento, se descentra más y más y una de las entradas adquiere mayor intensidad. Entonces, el amplificador operacional activa el motor, centrando las fotocélulas. Este circuito neuronal sigue el trayecto de una fuente luminosa sin necesidad de código de programación ni ecuaciones.

El circuito ofrece unas aplicaciones prácticas inmediatas al campo de la energía solar; puede conectarse a células, hornos y calentadores de agua de energía solar para conseguir la máxima alimentación luminosa.

El dispositivo puede, además, modificarse de varias formas. Por ejemplo, podemos conectarle un segundo circuito para que siga a una fuente luminosa que se mueva vertical u horizontalmente. Los lectores aficionados más ambiciosos podrían intentar sustituir las fotocélulas por sensores de otro tipo, tales como antenas de radio. Podrían así seguir a los satélites radioemisores en su camino por el firmamento. Fotocélulas sensibles a la radiación infrarroja podrían emplearse para seguir fuentes de calor, fundamento de la asignación de blancos en el campo militar. Son posibles bastantes aplicaciones más, pero no espere el lector que estas neuronas adquieran jamás conciencia.

Programación neuronal

El autor redactó un programa en BASIC que emula a un sistema neuronal primitivo. Me refiero al Perceptrón, creado en 1957 por Frank Rosenblatt, de la Universidad de Cornell. El Perceptrón es capaz de aprender a identificar formas y letras. Images Company (P.O. Box 140742, Staten Island, NY 10314, (718)698-8305)) facilita ese programa, así como algunos otros sobre sistemas neuronales artificiales, en soporte de disquete compatible IBM al precio de $9,95, más $5,00 por gastos de envío y manipulación.

Juegos matemáticos

Ian Stewart

La razón de Steiner

Paco estaba exasperado. "El camino más corto entre dos puntos es la línea recta", gritó.

"Y yo estoy de acuerdo", respondió sin alterarse Horacio Steiner. "Sólo quiero hacer notar que los puntos no tienen que ser por fuerza ciudades reales."

"¿Dónde quieres entonces que situemos los puntos adicionales?"

"¡Ah! Esa es la cuestión."

Cables Astinos de España era una sociedad subsidiaria de Mercados y Fundiciones que tenía un contrato público para enlazar por cable tres ciudades, Porculé, Sardañal y Turís, y formar una red informática. Sus dos jefazos estaban encontrando dificultades para acordar una estrategia. A juicio de Paco, lo que convenía era elegir una ciudad base y conectarla a las otras dos mediante tendidos rectilíneos.

"¿Qué ciudad elegiremos como base?", quiso saber Horacio.

"Nada más sencillo. Se toma el triángulo cuyos vértices son las tres ciudades y se elimina el lado mayor. Será suficiente tender los dos lados restantes."

"Parece razonable, sí. Pero..."

Horacio pensaba que añadiendo a la red una ciudad más se podría reducir la longitud de la red. Puede que eso parezca inverosímil: al ser más las ciudades, mayor habría de ser el tendido. Sin embargo, a veces resulta ser así. ¿Dónde debemos, pues, situar la ciudad adicional para economizar el máximo de cable, y cuánto es el cable que se ahorra en ese caso?

Resulta que Porculé, Sardañal y Turís están todas, tomadas dos a dos, a la misma distancia: 75 kilómetros. La red propuesta por Paco tendría, por consiguiente, 150 kilómetros. ¿Y la sugerida por Horacio? Vamos a crear una nueva localidad en el seno de esta región, coincidiendo sensiblemente con el centro del triángulo equilátero definido por las tres ciudades. Esta, a la que llamaremos Villamedia, se encontraría a unos 44 kilómetros de cada una de las tres iniciales.

"Fíjate, Paco. Si ubicamos un nudo de la red en Villamedia y desde allí llevamos una línea hasta cada una de las tres ciudades, estoy seguro de que ahorraremos cable."

"¡Bobadas!"

"Te digo que no. Para tender las líneas desde Villamedia hasta las tres ciudades nos harían falta 3×44 kilómetros = 132 kilómetros, en lugar de 150, con lo que ahorraríamos 18 kilómetros, o sea, alrededor de un 12 por ciento."

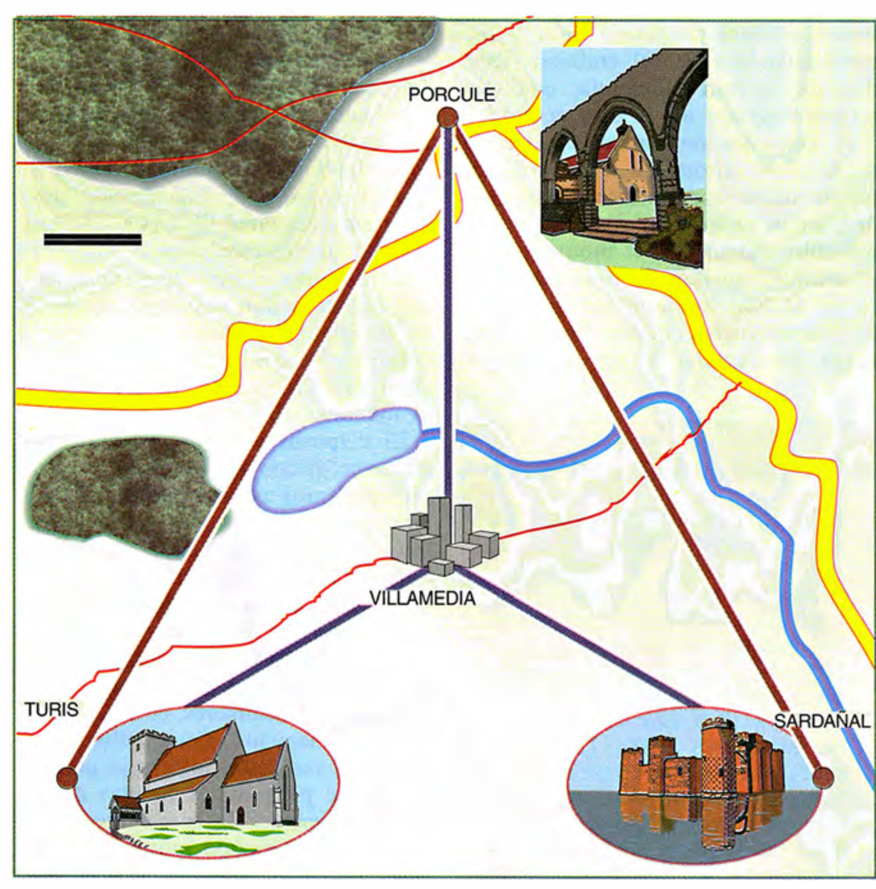
"Tienes razón, así se ahorra cable."

"Desde luego", prosiguió Horacio, "podríamos plantearnos idénticas cuestiones para un conjunto arbitrario de ciudades. ¿Cuál es la red más corta que las conecta todas, con la condición de que los nudos se encuentren precisamente en ellas? ¿Y cuál será la red mínima si es lícito añadir nudos suplementarios donde nos convenga?"

"Sí. Y sobre todo, ¿cuánta es la ganancia que se consigue en la red con nudos adicionales? Porque ése es el quid", añadió Paco.

"Vamos a consultar la base de datos", dijo Horacio.

Regresó algunas horas después. "Paco, no somos los primeros en plantearse estas cuestiones. Edgar Gilbert y Henry Pollack, de los Laboratorios AT&T Bell, conjeturaron ya en 1968 que cualquiera que sea la disposición de las ciudades iniciales, la economía máxima alcanzable por adjunción de nudos es del 13,4 por ciento.



1. Forma de economizar línea añadiendo una ciudad. El tendido rojo tiene una longitud de 150 kilómetros; el azul, de 132

Se la conoce por conjetura de la razón de Steiner."

"¿Por qué no conjetura de Gilbert-Pollack?"

"A causa de las reglas habituales de atribución en matemáticas."

"¿O sea...?"

"Verás, Paco, la idea es bautizada en recuerdo del personaje histórico que fue el primero en enunciar más o menos vagamente el problema, aunque no haya sido el autor del resultado. Por otra parte, ahora resulta necesario referirse al teorema de la razón de Steiner."

"Del teorema de Gilbert-Pollack", insistió Paco.

"En realidad, del teorema de Du-Hwang, porque en 1991, después de 23 años de esfuerzos tan tenaces cuan infructuosos, el resultado fue demostrado por Ding Zhu Du, de la Universidad de Princeton, y por Frank Hwang, de los Laboratorios Bell."

"Representaremos las ciudades a enlazar mediante puntos de un plano, y las líneas a tender, por segmentos rectilíneos. Tanto si añadimos nuevas ciudades como si no, es evidente que las líneas deberán formar un árbol, esto es, un grafo abierto, sin mallas. En una malla cerrada se malgasta cable, pues conecta ciudades que ya estaban enlazadas por otra ruta. Se dice que un árbol es directo si no participa en él ninguna ciudad suplementaria. Aunque puede haber muchos árboles directos que enlacen las ciudades dadas, sería posible confeccionar la lista completa y mirar cuál es el más corto.

"Supongamos que las ciudades sean cuatro, Lugones, Santervás, Bentón y Docal. En la figura 2 podemos ver algunos árboles directos y sus longitudes correspondientes. El árbol más corto posee una raíz, o nodo radical, Bentón, del cual arrancan las líneas a las otras tres ciudades.

"El problema se complica si las líneas pueden también conectarse fuera de las ciudades consideradas. Tomemos de nuevo el ejemplo inicial, en el cual tres ciudades definían un triángulo equilátero (Porculé, Sardañal y Turís). Resulta que el árbol ramificado de longitud mínima es el que las conecta al centro del triángulo (Villamedia). El grafo mínimo tiene que ser un árbol; los árboles ramificados de este tipo se denominan árboles de Steiner."

"¿Quién fue Steiner, y qué tuvo que ver con este problema?", quiso saber Paco.

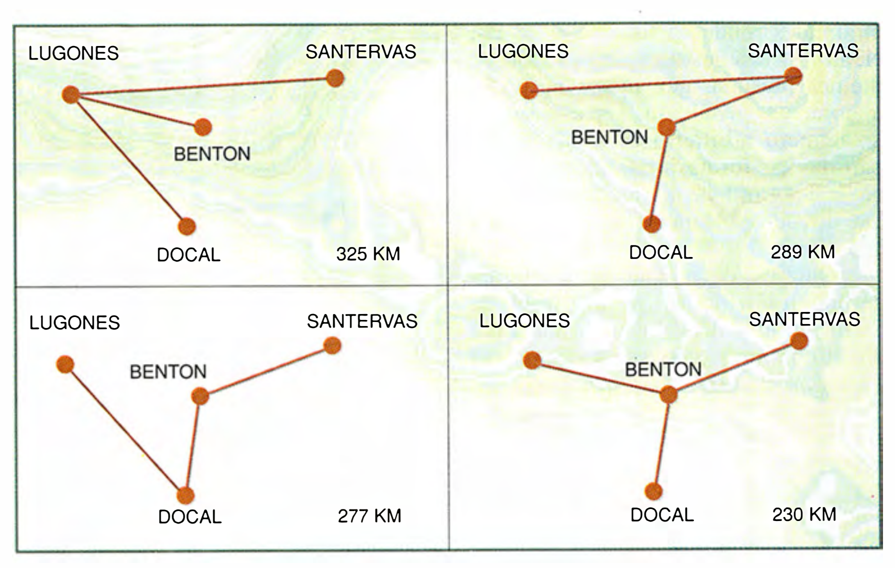
"No gran cosa", respondió Horacio. "Steiner fue un matemático suizo del siglo XIX, que resolvió en 1837 el problema de las tres ciudades. Fueron Richard Courant y Herbert Robbins quienes asociaron su nombre al problema, en 1941. Al parecer, ignoraban que todos ellos habían sido precedidos por Torricelli y Cavalieri, hacia 1640."

"¿Torricelli? ¿El inventor del barómetro?"

"El mismo. Cavalieri fue un precursor del cálculo diferencial. Torricelli y Cavalieri descompusieron el problema en varios casos. Si alguno de los ángulos del triángulo mide más de 120 grados, el grafo minimal consta de dos segmentos, a saber, los dos lados de ese ángulo. En caso contrario, estará formado por los tres segmentos que enlazan las tres ciudades con el punto de Steiner (también llamado punto de Torricelli), que es el único punto desde el cual los tres lados del triángulo se ven todos bajo un ángulo de 120 grados.

"Steiner demostró también que, en el caso de mayor número de ciudades, las ramas de todo árbol de Steiner tendrían que formar ángulos de 120 grados en cada una de las ciudades añadidas, como se deduce de la solución para el caso de tres ciudades. La determinación de tales árboles es problema más arduo. El problema de establecer un árbol de Steiner minimal para conectar más de tres ciudades no fue atacado hasta 1934, por Milos Kössler y Vojtech Jarnik. Como puedes ver, no es sencillo hallar un árbol de Steiner minimal en todos los casos", concluyó Horacio.

"Tienes razón. El cálculo es mucho más complicado que en la determinación de un árbol directo minimal; hay que considerar una infinidad de posibles puntos de Steiner", convino Paco.



2. Cuatro de los 16 árboles directos posibles correspondientes a cuatro ciudades. El árbol del recuadro inferior derecho es el más corto de los 16

"Exactamente. Veamos un caso sencillo: el de seis ciudades situadas en los vértices de dos cuadrados adyacentes (*figura 4*). En la figura *4a* se muestra un árbol de Steiner de poca longitud; se ha obtenido resolviendo primero el problema para el cuadrado de cuatro ciudades, que se enlazan después a las dos que faltan a través del punto de Steiner de estas dos con una de las ya conectadas."

"Entonces, ¿es ésa la solución?"

"No. El árbol de Steiner minimal es el grafo mostrado en la figura *4b*. Y además, esto demuestra que no podemos construir árboles de Steiner por reducción de mallas."

"Ya veo, ya", suspiró Paco. "¿Y en qué ha consistido la aportación de E. Gilbert y H. Pollack?"

"Se propusieron averiguar si sería posible relacionar las dos versiones del problema. Llamemos longitud directa de un sistema de ciudades a la de un árbol directo minimal, y longitud de Steiner, a la de un árbol de Steiner minimal. Habida cuenta de que todo árbol directo es un árbol de Steiner de tipo particular (un árbol que carece de nodos nuevos), se sigue que la longitud directa es mayor o igual que la longitud de Steiner. La pregunta es ¿cuánto mayor puede ser?"

"Bueno", dijo Paco. "En el caso de un triángulo equilátero de lado unidad, la longitud directa es 2, y la de Steiner, $\sqrt{3}$."

"Exactamente", repuso Horacio. "Por tanto, en ese caso, la razón de la longitud de Steiner a la directa es $\sqrt{3} : 2 = 0,866...$ Lo que significa que la economía de longitud correspondiente a un árbol de Steiner minimal con respecto a los árboles directos

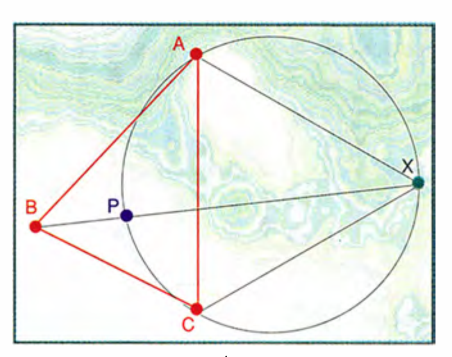
minimales ronda en torno al 13,4 por ciento. Y la conjetura de la razón de Steiner presume que nunca se podrá mejorar ese resultado. En el caso de un número arbitrario de ciudades repartidas de forma arbitraria, la razón de la longitud de Steiner a la longitud directa es siempre mayor o igual que $\sqrt{3/2}$."

"¿Quieres decir que la economía de longitud, al utilizar un árbol de Steiner minimal en lugar de un árbol directo minimal, no supera jamás el 13,4 por ciento?", inquirió Paco.

"Exactamente. O sea, aunque lográsemos calcular una solución optimal, no podríamos ahorrarnos más del 13,4 por ciento del costo total de la línea correspondiente a un árbol directo minimal."

Problemas similares, aunque mucho más complejos, se presentan en la práctica cada vez que una compañía proyecta tendidos de líneas telefónicas, de distribución de gas, de televisión por cable, de líneas de autobús, de ferrocarriles o de líneas aéreas. Uno de los métodos de estudio de la evolución de los organismos vivos ha suscitado una cuestión estrechamente relacionada con los problemas anteriores. El material genético es el ADN, en el que está codificada la información necesaria para la vida, según una secuencia de bases de cuatro tipos (adenina, timina, citosina, guanina). En esta descripción simplificada, la información genética está descrita por una larga sucesión de bases, del tipo AATTCGCTCA... En la aplicación de los árboles de Steiner, las "ciudades" son las secuencias de ADN en los diversos organismos, y su "distancia" consiste en una cierta medida de su diferencia, como la proporción de diferentes bases de igual rango. Los puntos de Steiner corresponden a "antepasados comunes más plausibles". No existe, desde luego, ninguna garantía de que tal antepasado común haya existido, pero el método proporciona indicios interesantes acerca de la forma en que podría haber cambiado la molécula de ADN y sobre el parentesco genético entre organismos.

Hay muchos otros problemas análogos a estos de los árboles de Steiner. El más importante, desde el punto de vista práctico, se plantea en la concepción de los circuitos electrónicos. En ellos, por lo general, las conexiones siguen los lados de una red de cuadrículas, pero las cuestiones que se plantean y los métodos que se aplican son similares. La conjetura de la razón de Steiner tiene importancia en la "economía" de toda red de conexiones, porque —como



3. Construcción del punto de Steiner correspondiente al triángulo ABC: se dibuja un triángulo equilátero ACX; su circunferencia circunscrita corta a BX en el punto de Steiner, P

acabamos de ver— es mucho más fácil encontrar un árbol directo minimal que un árbol de Steiner minimal. Por esta razón, muy bien pudiera resultar prudente aceptar el 13,4 por ciento de error para economizar costos de cálculo.

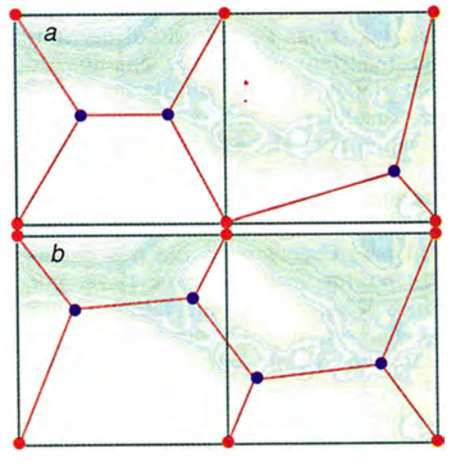
"¿Sabías —dijo Horacio— que hasta ahora, AT&T aplicaba la longitud directa para facturar a los clientes que deseaban conectar el conjunto de sus oficinas? ¡En consecuencia, éstos podrían haber conseguido ahorros sustanciales en sus facturas inventando oficinas imaginarias en puntos de Steiner apropiados! La conjetura limita tales ganancias al 13,4 por ciento, lo que no es catastrófico."

"¿Por qué no se evitó AT&T esta preocupación calculando la longitud de Steiner?", preguntó Paco.

"¡Porque no podía!"

"¿Y por qué no?"

Horacio dejó escapar un suspiro. "El cálculo de la longitud directa es sencillo, incluso aunque el número de ciudades sea muy grande. Se puede



4. Un árbol de Steiner para un cuadrado y un triángulo rectángulo isósceles (a). Arbol de Steiner más corto para el mismo conjunto de ciudades (b)

utilizar el 'algoritmo glotón': se busca la conexión más corta entre dos ciudades y después se va construyendo el árbol mediante la adición, en cada etapa, de la conexión restante más corta que no forma una malla cerrada; y así hasta que el árbol contiene a todas las ciudades."

"Horacio... ¿qué es un algoritmo?"

"Es un proceso específico utilizable en ordenador y que conduce a la solución."

"¿Por qué se le llama 'algoritmo glotón', si en cada etapa se conforma con la distancia mínima?"

"Porque, según creo, se parece a otros que operan seleccionando siempre la mayor de las 'cosas' accesibles, y a estos algoritmos se les llama 'glotones'."

"¿Existe algún algoritmo para encontrar un árbol de Steiner minimal?", insistió Paco.

"¡Ah! ¡Ahí está el busilis!", contestó Horacio.

"¿Por qué no tomar todas las posibles ternas de ciudades, determinar sus puntos de Steiner y buscar después el árbol directo más corto que conecta las ciudades y cuyos nodos se encuentran, ora en las ciudades, ora en puntos de Steiner?"

"Difícil. La generalización correcta de 'punto de Steiner' para un conjunto de gran número de ciudades es todo punto en el cual concurre un sistema de segmentos formando ángulos de 120 grados. Para un caso tan sencillo como el de cuatro ciudades situadas en los vértices de un cuadrado, tales puntos no son puntos de Steiner de una terna (*figura 6*)."

"Ya veo. Y en el plano hay infinitos puntos..."

"Así es. A pesar incluso de que la mayoría son inadecuados, ¡no es nada seguro que existan algoritmos finitos!"

"¿Y existe alguno?", preguntó Paco.

"Pues sí. El primero fue inventado por Z. Melzak. Pero en realidad su método no es utilizable; es ineficaz aun cuando el número de ciudades sea pequeño. Se mejoró luego, pero sólo mediocremente."

"¿Por qué habrá de ser todo tan difícil?", se lamentó.

Horacio se retrepó en su asiento e hizo un gesto ampuloso. "Paco, existen poderosas razones para que estas soluciones resulten ineficaces. El uso creciente de ordenadores ha provocado el desarrollo de una nueva rama de las matemáticas, la teoría de la complejidad. Esta teoría no se limita a estudiar los algoritmos —o sea, los métodos de resolución de problemas—, sino también su rendimiento."

"Creo que no te entiendo."

"Verás. Sea un problema concerniente a un conjunto de n objetos —ciudades en nuestro caso. ¿A qué velocidad crece el tiempo de ejecución del algoritmo que lo resuelve, conforme crece n? Cuando ese tiempo no excede de un múltiplo constante de una potencia fija de n, como en $5n^2$ o en $1066\ n^4$, se dice que el algoritmo es ejecutable 'en tiempo polinómico' y el problema se considera 'fácil'. En general, eso significa que el algoritmo es utilizable. Si el tiempo de ejecución no es función polinómica del tamaño del problema, sino que —sea por caso— crece exponencialmente, como 2^n o 10^n, el problema no es 'de tiempo polinómico' (o de clase P), y se considera 'difícil'. En general, el algoritmo resulta imposible de llevar a la práctica."

"¿No puedes darme algún ejemplo?"

"Bueno. La suma de dos números de n cifras exige a lo sumo $2n$ sumas de una cifra (contados los posibles arrastres), por lo que el tiempo consumido en efectuarla está acotado superiormente por un múltiplo de la primera potencia de n (el doble del tiempo requerido para hacer una suma de tres números de una cifra). Una multiplicación de dos números de n cifras entraña alrededor de n^2 multiplicaciones por una cifra y no más de $2\ n^2$ sumas, por ejemplo $3\ n^2$ operaciones con las cifras; de modo que en este caso la acotación contiene sólo la segunda potencia de n. Estos problemas, pues, se consideran 'fáciles'."

"¡Entendido!"

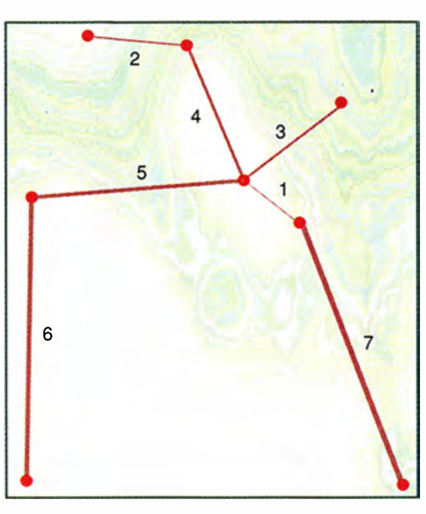
"Bien. Fijémonos ahora en el llamado 'problema del viajante'. Consiste en hallar el trayecto más corto que puede tomar un representante de comercio para visitar todo un conjunto dado de ciudades. Si el número de éstas es n, el número de itinerarios a considerar, $n! = n(n-1)(n-2)... 3 \cdot 2 \cdot 1$, crece más deprisa que todas las potencias de n, por lo cual una enumeración exhaustiva, caso por caso, es desesperadamente ineficaz."

"Ya veo", dijo Paco. "Y entre los tiempos polinómicos y los exponenciales, ¿qué pasa?"

"Es territorio virgen, que comprende desde problemas 'cuasi-triviales' a 'moderamente difíciles', cuya aplicabilidad es sobre todo cuestión empírica."

"Comprendo."

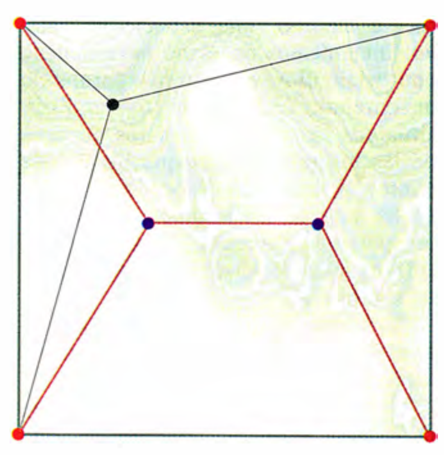
"El gran problema de la teoría de complejidad", prosiguió Horacio, "consiste en demostrar que la teoría no está vacía de contenido; esto es, la existencia de un problema 'interesante' que sea verdaderamente difícil. Y ¡la dificultad estriba en que es fácil demostrar que un problema es fácil, mientras que es difícil demostrar que es difícil! Para demostrar que un problema es fácil basta con hallar un algoritmo que lo resuelva en tiempo polinómico. No tiene por qué ser el mejor ni el más sagaz. En cambio, para demostrar que un problema es difícil, no basta con hallar algoritmos que lo resuelvan en tiempos no polinómicos. Será necesario encontrar un método matemático para considerar todos los algoritmos posibles que resuelven el problema y demostrar que ninguno de ellos lo hace en tiempo polinómico."



5. En el algoritmo "glotón" las ciudades se conectan de dos en dos por orden de distancias crecientes, sin formar mallas

"¡Ay! Me imagino perfectamente que eso puede resultar difícil. ¿No sabes de ninguna conjetura bien encarrilada?"

"Hay muchos candidatos que plausiblemente constituyen problemas difíciles. El problema del viajante, el problema del embalado de cajas (que consiste en disponer de forma óptima un conjunto de ejemplares de tamaños dados en un conjunto de bolsas de cierto tamaño), el problema del relleno (dado un saco fijo de cierto tamaño y una multitud de objetos, ¿existe una colección de objetos que rellenen exactamente el saco?). Aunque nadie ha demostrado que ninguno de ellos es difícil, en 1971 Stephen Cook adelantó que, si uno cualquiera de los problemas de este grupo es efectivamente difícil, todos los demás lo son también. La idea de la demostración es que podemos 'codificar' cada uno de ellos convirtiéndolo en caso particular de cualquiera de los demás: o todos flotan, o todos se hunden juntos. Los problemas de este tipo se denominan NP-completos, donde NP es abreviatura de 'no polinómico'. Todo el mundo está convencido de que se trata de problemas verdaderamente difíciles."


6. Los puntos de Steiner (blanco) *correspondientes a cuatro ciudades que definen un cuadrado* (negro) *difieren de los correspondientes a un subconjunto de tres ciudades* (gris)

"¿Por qué?"

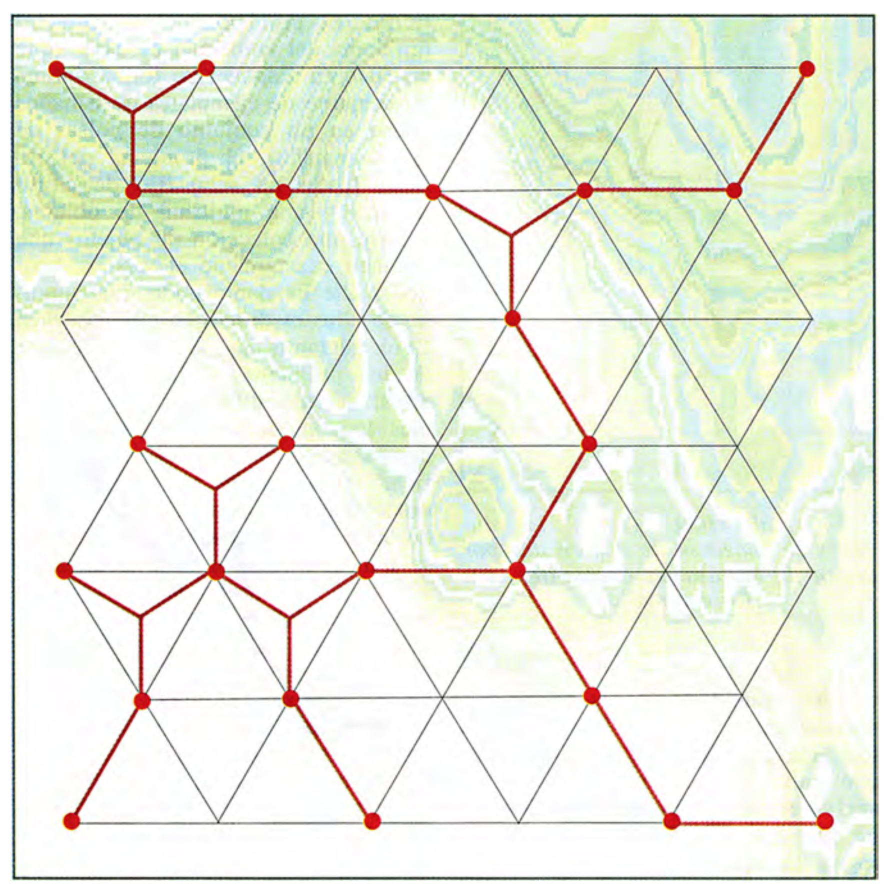
"Por compulsión psicológica, que nos hace sentir que es imposible conseguir de un golpe todo lo bueno. Ron Graham, Michael Garey y David Johnson han demostrado que el problema de la longitud de Steiner es NP-completo. Un algoritmo eficiente para calcular la longitud de Steiner de todo conjunto de ciudades conduciría automáticamente a soluciones eficientes de toda suerte de problemas computacionales, que presuntamente no las poseen."

"Así pues, ¿todo cuanto nos gustaría saber sobre los algoritmos se reduce a un problema específico concerniente a redes de comunicaciones?", se asombró Paco.

"En efecto. O a uno cualquiera de un millar de otros problemas concretos. Resolver uno es resolverlos todos. La conjetura de la razón de Steiner es importante por otro motivo, pues demuestra que se puede reemplazar un problema difícil por otro fácil sin perder demasiado. Lo cual entraña que los métodos utilizados para demostrar que así es son igualmente importantes."

"¿Y qué métodos son ésos?"

"Pues verás. El ejemplo del triángulo equilátero, que ha dado pie a todo este asunto, es muy natural. Sugiere que debe existir una demostración sencilla de la conjetura. Sin embargo, su simplicidad puede resultar engañosa; si existe una demostración sencilla, nadie la ha encontrado jamás. La propia demostración de Du-Hwang es harto complicada. Y, dejando de lado su demostración, los ataques directos para un pequeño nú-



7. Un árbol de Steiner para ciudades situadas sobre un enrejado triangular posee una estructura mucho más rígida y regular que en el caso general. Ding Zhu Du y Frank Hwang consiguieron reducir la conjetura de la razón de Steiner al mismo problema para el caso de estas redes de mallas triangulares

mero de ciudades conducen a cálculos largos y no generalizables. E. Gilbert y H. Pollack dispusieron de gran número de indicios en favor de su conjetura, y, en particular, pudieron demostrar que en todos estos cálculos había una cosa cierta: la razón es siempre mayor que 0,5. Hacia 1990, diversas personas habían llevado a término cálculos heroicos para verificar la conjetura en las redes de cuatro, cinco y seis ciudades. En el caso general, el de número arbitrario de ciudades, fueron empujando las cotas de la razón de Steiner de 0,5 a 0,57, a 0,74 y 0,8. Hace algunos años, Ron Graham y Fang Chung la elevaron a 0,824, con cálculos que ellos describen como 'verdaderamente horribles'. Estaba claro que el método no era bueno."

"Si ellos lo dicen..."

"Sus trabajos son más útiles de lo que te pueda parecer, pues enfocan la atención sobre métodos más abstractos y más conceptuales. Para lograr una progresión ulterior era preciso simplificar esos horribles cálculos. D. Z. Du y F. Hwang encontraron un método tan superior que los elimina por completo. La cuestión de base es ¿cómo introducir triángulos equiláteros? Entre el ejemplo del triángulo que proporciona la acotación inferior de la razón y un conjunto cualquiera de ciudades que presuntamente ha de obedecer a la misma acotación media un abismo. ¿Cómo atravesar esta tierra de nadie?

"Estamos llegando a un punto extraordinariamente interesante. Hay, a medio camino, una especie de relevo. Imaginemos un plano pavimentado con triángulos equiláteros formando un enrejado rectangular (*figura 7*), y situemos las ciudades en los vértices de las losetas. Resulta que los únicos puntos a considerar son los centros de las teselas. En resumen, se obtiene un potente elemento de control no sólo de los cálculos, sino de los análisis teóricos."

"Brillante. Pero los sistemas de ciudades no pertenecen todos a retículos triangulares."

"Desde luego que no. La idea de D. Z. Du y de F. Hwang es que éstos son los únicos casos importantes. Supongamos que la conjetura sea falsa. En tal caso, ha de existir un contraejemplo, esto es, cierto sistema de ciudades para el cual la razón de Steiner es menor que $\sqrt{3}/2$. Ahora bien, dichos autores demostraron que de existir tal contraejemplo, habría también otro contenido en un enrejado triangular. Se introduce así en el problema un elemento de regularidad y resulta relativamente sencillo llegar a término."

"Pero, ¿cómo demostraron ellos esta propiedad?"

"Se trata de un maravilloso ejercicio de pensamiento lateral. Para empezar, formularon la conjetura como un problema de tipo minimax. Tales problemas aparecen en teoría de juegos, cuando los litigantes tratan de limitar las ganancias de sus oponentes (*minimizar el máximo*). La teoría de juegos fue inventada por John von Neumann y Oskar Morgenstern. En la versión de la conjetura de la razón de Steiner un jugador selecciona la 'forma' general del árbol de Steiner y el otro selecciona el camino más corto. D. Z. Du y F. Hwang deducen la existencia de un contraejemplo en retículo triangular partiendo del hecho de que, en su juego, la ganancia posee una propiedad de 'convexidad' especial. Este método, nuevo y elegante, elimina una cuestión aparentemente intratable, corta el nudo gordiano de una masa de cálculos inextricables que afrontan la investigación caso por caso, y propone una solución sencilla. El método de Du-Hwang representa una mejora tan espectacular que torna caducas todas las tentativas anteriores.

"Y lo que es aún más fundamental, tal método proporciona un paradigma para estudiar cuestiones análogas. Se formula el problema en términos de teoría de juegos y se demuestra una propiedad de convexidad adecuada; se reduce el problema a una cuestión combinatoria 'rígida' con muchas menos posibilidades que es, por fin, resuelta por el procedimiento que se prefiera. La máxima 'Pensar primero, calcular después' debería estar grabada en el corazón de todos los matemáticos."

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

STEINER MINIMAL TREES. E. N. Gilbert y H. O. Pollack, *SIAM Journal of Applied Mathematics*, vol. 16, págs. 1-29, 1968.

COMPANION TO CONCRETE MATHEMATICS. Z. A. Melzak, Wiley, New York, 1973.

STEINER PROBLEMS IN NETWORKS: A SURVEY, Pawel Winter, en *Networks*, vol. 17, págs. 129-167, 1987

EUCLIDEAN GEOMETRY ALIVE AND WELL IN THE COMPUTER AGE. B. Cipra, *SIAM News*, vol. 24, n.º 1, págs. 16-19, enero de 1991.

Libros

María José Báguena, Luis Alonso y Nicolás García Tapia

Mal de la rosa

En Asturias

LEPRA ASTURIENSIS. LA CONTRIBUCIÓN ASTURIANA EN LA HISTORIA DE LA PELAGRA (SIGLOS XVIII-XIX), por Delfín García Guerra y Víctor Alvarez Antuña. CSIC; Madrid, 1993.

La *Lepra asturiensis*, mal de la rosa o pelagra, es una entidad nosológica que apareció como nueva especie morbosa en la *Nosologia methodica* de Sauvages en 1760. Tal y como ha señalado López Piñero, la plena vigencia del programa de Sydenham se expresó principalmente en el cultivo de la indagación de lesiones anatómicas asociadas a la sintomatología clínica y en la descripción nosográfica. La cumbre de la primera tendencia es la obra de Morgagni; la descripción de la pelagra por Casal, un ejemplo sobresaliente de la segunda. Aunque posteriores estudios determinaron que esta enfermedad no era exclusivamente asturiana, la relación con dicha región se mantuvo hasta finales de la pasada centuria a través de los estudios que Ildefonso Martínez o Faustino García Roel le dedicaron, así como por su elevada incidencia en la región.

Los autores se plantean abordar una serie de problemas históricos en torno a la pelagra de gran interés epistemológico como son el contenido cambiante de los términos que sirvieron para designarla, sus factores causales y su carácter de "enfermedad social". En el primer capítulo se traza una breve panorámica de los principales descubrimientos en torno a la pelagra. La evolución cronológica es seguida a través de diferentes países, lo que proporciona una visión general de la "lepra asturiana". En la primera mitad del siglo XIX, interesaba especialmente la presencia de la enfermedad y sus manifestaciones clínicas, mientras que a partir de 1847 la polémica acerca de las posibles causas de la pelagra pasó a primer plano. Se había observado que este cuadro sólo existía de forma endémica en zonas donde el maíz constituía la principal fuente de alimentación. En concreto se suponía que el grano de este cereal se veía afectado por un parásito que hacía nocivo su consumo. Esta teoría "fitoparasitaria" era coherente con el pensamiento etiológico de la época. La idea de un parásito vegetal como origen de ciertas enfermedades empezó a cristalizar en torno a la década de los treinta y su inicio puede fijarse en los trabajos que sobre la muscardina del gusano de seda realizó Agostino Bassi, quien describió que dicha enfermedad era causada por un hongo parásito. Este hecho le llevó a formular la teoría del origen parasitario de las enfermedades infecciosas.

En el segundo capítulo se han recogido los textos de médicos asturianos o residentes en el Principado, que tuvieron que enfrentarse a la presencia continuada de la enfermedad en esta región. En el apartado siguiente se analiza la aplicación del método científico a la investigación sobre la pelagra. Este capítulo, poco habitual en un estudio histórico de una especie morbosa, lo justifican los autores por las peculiaridades de tal modo de enfermar, que hace que su investigación se centre en los datos clínicos, históricos y epidemiológicos más que en la sala de autopsias o en el laboratorio. Desde esta perspectiva se abordan el acercamiento clínico a la pelagra, desde el empirismo racional de Casal al pretendido hipocratismo de Roel, el acercamiento histórico, que constituye uno de los fundamentos del método científico de García Roel, el estudio epidemiológico, imprescindible en una enfermedad cuya distribución geográfica y social es tan característica, y el acercamiento científico-natural, que permitió el estudio anatomopatológico y en el laboratorio de la pelagra.

El problema nosológico de la pelagra es abordado desde los planteamientos epistemológicos propuestos por Ludwik Fleck. En sintonía con el escritor judío-polaco, los autores señalan la imposibilidad de entender, desde nuestros propios esquemas mentales, el concepto de pelagra que manejaban los médicos del mundo moderno y contemporáneo. El problema etiológico se plantea desde la convicción de que esta enfermedad se asociaba a la mala alimentación, permitiendo que los textos puedan utilizarse como fuentes para la historia social. (M. J. B.)

Scientia amatoria

Cabos sueltos

THE LANGUAGE OF SEX. FIVE VOICES FROM NORTHERN FRANCE AROUND **1200,** por John W. Baldwin. The University of Chicago Press; 1994.

AEGIDIUS AURELIANENSIS. QUAESTIONES SUPER DE *GENERATIONE ET CORRUPTIONE*. Edición preparada por Zdislaw Kuksewicz. B. R. Grüner; Amsterdam, 1993.

NOT OF WOMAN BORN. REPRESENTATIONS OF CAESAREAN BIRTH IN MEDIEVAL AND RENAISSANCE CULTURE, por Renate Blumenfeld-Kosinski. Cornell University Press; Ithaca, 1990.

EROS AND ANTEROS. THE MEDICAL TRADITIONS OF LOVE IN THE RENAISSANCE. Dirigido por Donald A. Beecher y Massimo Ciavolella. Dovehouse Editions Inc.; Ottawa, 1992.

SEXUAL KNOWLEDGE, SEXUAL SCIENCE. THE HISTORY OF ATTITUDES TO SEXUALITY. Dirigido por Roy Porter y Mikulás Teich. Cambridge University Press; Cambridge, 1994.

Ante la avalancha de libros y artículos sobre el sexo en todas sus vertientes, de la endocrina a la jurídica, pasando por la etológica y ética, podría crearse una falsa impresión de novedad. Pocos dudarán, sin embargo, de que las lucubraciones de Sigmund Freud constituyen un punto de inflexión en la consideración moderna, hasta el punto de que Roy Porter y Mikulás Teich dividen el volumen *Sexual Knowledge, Sexual Science* en dos partes principales: antes y después de Freud. Esta obra, aunque se aplica sobre todo al estudio de las actitudes sociales desde la revolución científica hasta nuestros días, presta atención a tiempos precedentes, que, como en el caso de la sexualidad en el mundo grecorromano y en la cultura hindú, ofrecen pautas de interés que irán apareciendo a lo largo de la historia.

Helen King identifica algunos rasgos del mundo clásico desde el epos homérico. La expresión de la sexualidad se centra en una desigualdad

fundamental, no sólo en las relaciones heterosexuales sino también en las homosexuales; a propósito de la homosexualidad, el sodomizado evidencia una relación de sujeción o dependencia (efebo o esclavo), cumpliendo un papel reputado aberrante, rechazo social que adquiere tintes más crudos en la homosexualidad femenina La objetualización de la mujer es otra nota distintiva. Los textos médicos no enunciaban juicios de valor, pero consideran la relación heterosexual como la práctica normal que reporta beneficios terapéuticos, según la ginecología hipocrática. Tampoco entran en el terreno moral los libros de medicina védicos, que coexisten con una visión misógina de la filosofía hindú. En el *Carakasamhita*, el cuerpo humano forma un microcosmos en el universo. La concepción resulta de la unión del semen masculino, el semen femenino y el descenso del espíritu, impelido por el karma de vidas precedentes; el semen femenino es sangre menstrual materna.

Siguiendo el camino abierto por Michel Foucault y Peter Brown, John W. Baldwin distingue, en *The language of sex*, hasta cinco tradiciones simultáneas en torno al año 1200. Este libro se ocupa de paráfrasis y traducciones de una selección de textos medievales sobre la sexualidad en la Francia septentrional. Conjuga cinco géneros distintos, cada uno de los cuales ha incoado una larga tradición, un estudio académico discreto y copiosa bibliografía.

La primera tradición es la Escuela de Laón, que recupera las ideas patrísticas en los textos sobre el matrimonio a comienzos del siglo XII; Graciano las sistematizó en leyes. Esta tradición teológico-canonista está representada por Petrus Cantor y sus discípulos Robert de Courson y Thomas de Chobham. No recurren a Aristóteles, conocido entonces principalmente a través de su lógica. (La metafísica y obras naturalistas del estagirita comienzan a traducirse del árabe al latín en la segunda mitad del XII.) Todo matrimonio debía ser monógamo (limitado a un solo hombre y una sola mujer), exógamo (excluyente de la consanguineidad o relación familiar con un matrimonio anterior), indisoluble (terminado sólo con la muerte de uno de los cónyuges) y libre (contrato plenamente consentido). Se fija la edad mínima en los 14 años para los varones y 12 para las mujeres.

La segunda tradición emergió, mediado el siglo undécimo, en Italia, cuando aparecieron las traducciones de tratados médicos al latín. El legado de Galeno se articula en torno a las *Cuestiones salernitanas*. Precedentes a la difusión de Aristóteles y Avicena, las *Cuestiones* se proponen entender la psicología y la fisiología subyacente a la sexualidad, privilegiando la lógica y la analogía sobre la observación empírica y la explicación por encima de la descripción. De la misma escuela es el *De coitu*, extraído de un tratado de Ibn al-Jazzar. Constantino, máximo exponente salernitano, trasladó también el *De genitalibus membris* (Sobre los órganos sexuales). Relacionado con esas obras estaba el *Liber minor de coitu*, centrado en las disfunciones sexuales y en su terapia. Las diferencias de sexo, en la medicina galénica arabizada, implican también diferencias de complexión: los hombres son calientes y secos, las mujeres frías y húmedas. La relación sexual (*coitus*) seca y enfría el cuerpo; éste se jerarquiza en cuatro órganos principales, dispuestos de la cabeza a las caderas, cada uno con su red correspondiente. Los tres primeros (cerebro/nervios, corazón/arterias, hígado/venas) eran denominados principales porque el cuerpo no podía funcionar sin ellos; el cuarto órgano principal, los genitales, aunque dispensables para la vida del individuo, eran indispensables para la propagación de la especie. Las anatomías de Salerno aceptaron una equivalencia fundamental entre los "testículos" del varón y de "la hembra", órganos principales de la generación. El líquido espermático, que fluye en ambos, está constituido de una sustancia pura exudada por todos los miembros y fluidos del cuerpo. Puesto que la naturaleza requiere que lo similar nazca de lo similar —la carne de la carne, el hueso del hueso— el semen debe generarse a partir del cuerpo entero. Las *Cuestiones* adoptaron la teoría de la pangénesis sobre el origen del esperma y definían el coito como la unión natural placentera de hombre y mujer, ordenada a la generación. Atribuyen el placer a la liberación de la tensión acumulada por la continencia, así como a la intervención del sistema nervioso, muy concentrado en los genitales.

Con la introducción de las obras de Aristóteles en Occidente comien-



Tentación de Adán y Eva. Procedente de un salterio que se supone pertenecía a la reina Doña Blanca de Castilla (1223-26)

za a tejerse una filosofía natural que presta soporte físico a las ideas biológicas y médicas. En la cuestión de la reproducción, el cañamazo natural es el tratado sobre la generación y la corrupción, fundamento último de la nueva botánica, zoología y antropología que instaura Alberto Magno. En ese marco cabe entender la obra de un discípulo suyo, Gil de Orleans, ahora presentada en edición crítica por Zdzislaw Kuksewicz: *Aegidius Aurelianensis. Quaestiones super De generatione et corruptione*.

Durante su carrera académica en la Facultad de Artes de París, en la segunda mitad del siglo XIII, Gil de Orleans se ocupó en dos ocasiones al menos del libro de Aristóteles *De generatione et corruptione*. Se apoya también en Averroes. Fruto de esa dedicación son las dos versiones manuscritas de las *Quaestiones*, una extensa y otra abreviada, aquí analizadas a través de los cuatro ejemplares que han llegado hasta nosotros. Para sumergirse en su lectura se necesitan unas nociones básicas del hilemorfismo y de la estructura argumental de las cuestiones medievales, que se distinguen por enunciar una tesis en condicional, exponer primero las objeciones en contra de la misma y luego rebatirlas para mostrar la tesis, ahora ya sin condicional.

En la filosofía natural aristotélica, de cualquier tema conviene saber si podemos tener un conocimiento científico. Poseemos ciencia de un asunto cuando podemos establecer las causas que posibilitan en todo momento e instancia el fenómeno considerado. Vale decir, desde una óptica aristotélica, no existe ciencia de la generación de este animal o de aquella planta, pero sí de la generación en sí misma. Acota la diversa relación con la creación, la transformación, el crecimiento o el movimiento. A propósito de la generación del ser humano, Gil de Orleans defiende la continuidad del embrión desde el instante de su concepción, contra quienes aducían una secuencia de pasos discretos basados en una suerte de epigénesis.

De los principios generales a los casos prácticos. La operación cesárea, estudiada entre nosotros por R. Sánchez Arcas, cuenta con una copiosa bibliografía. Con un enfoque globalizador, y dentro de la corriente contemporánea de reinterpretación del papel de la mujer en el curso de la civilización occidental, Renate Blumenfeld-Kosinski, siguiendo las pautas de Danielle Jacquart, ha escrito su ensayo *Not of Woman Born. Representations of Caesarean Birth in Medieval and Renaissance Culture*. Lo divide en cuatro partes: aspectos médicos, imaginería artística, la paulatina pérdida del papel de la mujer y condenación y exaltación de las obstetras.

La operación cesárea mantuvo largo tiempo la ambivalencia dramática de la vida otorgada al nonato y la muerte, casi segura, de la madre. Así se convirtió en lugar apropiado para la superstición y fantasías. Para su rastreo hay que buscar fuentes médicas (el primer testimonio escrito aparece muy tarde, en torno a 1305), religiosas (textos penitenciales) e históricas.

El alumbramiento no fue ajeno a los médicos de la colección hipocrática, que lo atribuían al propio feto, falto de alimentación. Galeno introdujo dos fases en el proceso con los conceptos correspondientes: la fuerza o *vis pulsatrix* y la *vis expulsatrix*. En el siglo segundo, la *Ginecología* de Sorano de Efeso se ocupa ya, por separado, de la fisiología de la mujer, la gestación y el nacimiento; consagra, además, especial atención a la labor de las parteras. De este tratado sólo nos han llegado fragmentos. Al detallar los procesos a seguir en la extracción del feto insiste en el principio básico de salvar la vida de la madre. La experiencia de las comadronas debía tomarse también en consideración.

El testimonio más antiguo de nacimiento por cesárea se remonta al segundo milenio antes de Cristo, y aparece en una tableta cuneiforme de Mesopotamia que contiene un texto legal relativo a la adopción de un niño, "sacado del vientre de la madre". El primer testimonio explícito es del año 715 a.C. cuando Numa Pompilio proclama la *lex regia*, que establece la ilegalidad, salvo acusación de homicidio, de dar sepultura a una mujer encinta antes de haberle extraído el feto. La *lex regia* se incorporó en los *Digesta* del emperador Justiniano. Ambroise Paré rechaza todavía la cesárea en mujer viva por el particular riesgo de desangrarse que corre la madre. Contra esa objeción de la hemorragia se levanta François Rousset en *Traité nouveau de l'hystérotomtokie, ou enfantement caesarien* (1581). El libro de Rousset despertó una polémica agria entre partidarios y contrarios a la cesárea.

Este siglo, el décimosexto, fue pródigo en incursiones en los fundamentos médicos del mal de amores y en sus remedios, en utopías creadoras de hasta un ministerio del amor en la *Ciudad del sol*, de Campanella. Nos acerca a ese momento *Eros and Anteros. The Medical Traditions of Love in the Renaissance*, obra pergeñada y dirigida por Donald A. Beecher y Massimo Ciavolella. Se parte de la hipótesis de que en el entramado cultural del Renacimiento el amor apasionado trasciende el mero recurso literario para convertirse en sujeto de estudio clínico y patológico. Los autores han centrado su atención en los escritos de Marsilio Ficino, Jan Wier, Bodin, Battista Fregoso, Mario Equicola, Tasso, Campanella, Giovan Battista della Porta y Robert Burton, o dicho en términos de las ideas que los identifican, en cuestiones sobre humores (melancolía), brujería, locura, memoria e imaginación, celos, amor platónico y utópico, poesía amatoria.

Desde la óptica médica medieval, las causas del amor apasionado, así como los remedios, nada tienen que ver con encantamientos, filtros y otros medios ocultos; lo mismo que otros males, éste debíase al desequilibrio entre humores y a la alteración de la imaginación. Arnau de Vilanova intentará reconducir los supuestos actos diabólicos a una condición melancólica, o patológica. Pero la fuerte corriente hermética del XVI reforzará la inclusión de la intervención diabólica. Johann Nider retuerce la argumentación de Arnau y dirá que atribuir el amor erótico o "hereos", el patológico, a la melancolía no es más que aceptar el disfraz del que se vale el demonio para provocarlo. A principios del XVII, Jacques Ferrand y Daniel Sennert no mostrarán rebozo en aceptar la acción determinante de los filtros y encantamientos.

Fregoso sistematizó las medidas a tomar contra el enamoramiento enfermizo, el pensamiento obsesivo, en *Anteros, sive tractatus contra amorem*. Escrito en forma de diálogo, reconduce la patología al terreno médico de los humores y los trastornos de la melancolía. Eros es un apetito destructor y cruel que debe ser sometido en nombre de la salud y de la vida racional; el amor "desordenado" es, por encima de todo, un deseo de ayuntamiento carnal, causado por un exceso de fluido espermático, capaz de afectar al corazón y al cerebro. Para su apaciguamiento se insiste en la combinación de dieta con ejercicio físico.

En el siglo de la revolución científica, y retomamos *Sexual Knowledge, Sexual Science*, seguimos encontrando las dos fuentes principales de estudio de la sexualidad, los tratados morales y los escritos médicos, que se complementan. Para los moralistas ingleses, la sexualidad tenía que ser entre sexos opuestos, genital y restringida al matrimonio. Para los mé-

dicos, la sexualidad estaba vinculada con la salud corporal. Thomas Willis refuerza el cambio de escenario que iniciara Harvey mediante el descubrimiento de la circulación de la sangre: las enfermedades relativas a la sexualidad (histeria) ya no se deben a fluidos que emergen del útero y ascienden hasta el cerebro, sino que es éste el primer responsable.

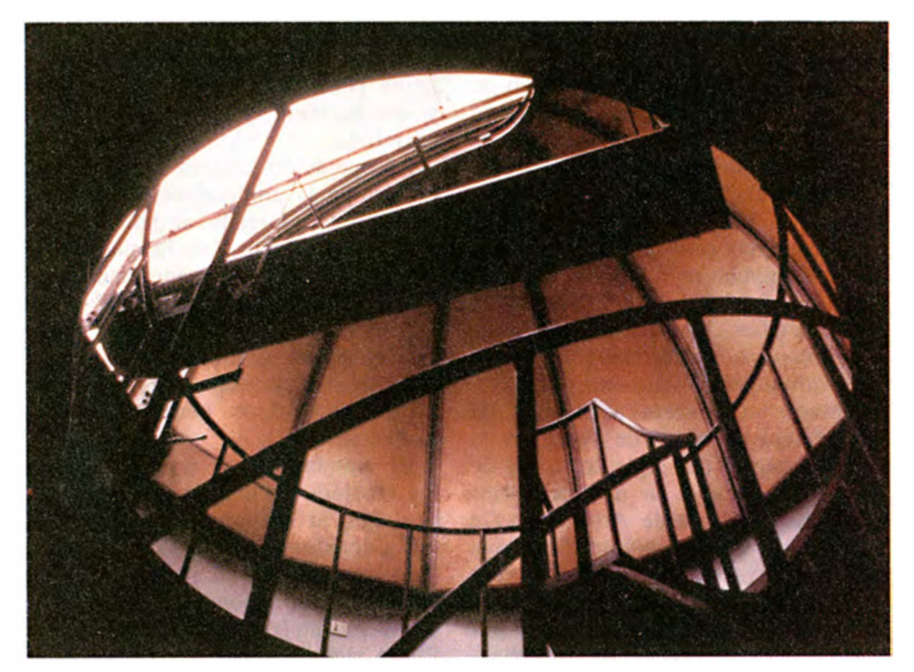
Roy Porter desarbola el tópico, entrecomillado por él de "progresista", según el cual Occidente habría vivido siglos de represión. Se apoya en una exhaustiva bibliografía de diversa índole, académica y popular. Cifra ambas condiciones, médica y divulgativa, en el *Tableau de l'amour conjugal*, escrito por Nicolas Venette y publicado en 1696, del que recuerda que tuvo 31 ediciones en su lengua original antes de 1800 y fue traducido al inglés, alemán, holandés e *incluso* al español (el ponderativo es suyo). En el siglo XIX, el avance de la zoología y etología (de primates sobre todo) ofrece nuevas fuentes donde inspirarse. Y la introducción de la teoría de la selección sexual darwinista llevaría al terreno de los principios biológicos básicos la importancia del sexo. La teoría de la selección sexual enunciada por Darwin proponía la existencia de competencia entre los machos por tener acceso reproductor a la hembra, del que resultaban ventajas evolutivas. Con Richard von Kraft-Ebing y Freud, la psiquiatría se apropia de la explicación del comportamiento normal y patológico de la sexualidad. Es el momento en que nacen los estudios sobre masoquismo, sadismo, fetichismo y otras desviaciones, y se glosan los *Tres ensayos sobre la sexualidad* del médico vienés. (L. A.)

Telescopios

De reflexión

Sul telescopio a riflessione, por E. Borchi y R. Macii. Osservatorio Ximeniano; Florencia, 1992.

Sobre la historia del telescopio hay una abundante bibliografía, centrada en el origen, desarrollo y técnica del instrumento que ha revolucionado nuestro conocimiento del universo. Menos son, sin embargo, los libros dedicados al estudio del telescopio reflector, un instrumento que ha competido ventajosamente con el tradicional de lentes, utilizado por Galileo para dar su nueva visión del sistema planetario. El telescopio de reflexión surge casi inmediatamente por la necesidad de contrarrestar los efectos de aberración cromática que producían las primeras lentes. Desde entonces, el reflector ha sido perfeccionado de forma casi continua, presentando numerosos retos a los científicos y a los técnicos, tanto por la necesidad de realizar espejos con una gran perfección, como por el gran tamaño del instrumento requerido para la observación de estrellas lejanas, cada vez con mayores aumentos.



Telescopio de Tito Gonnella del Observatorio Ximeniano de Florencia

Tan sugestivo tema ha sido tratado por los autores de este libro de una forma sencilla y al mismo tiempo rigurosa. Nos dan una visión muy completa de la evolución y el desarrollo del reflector a través de los tiempos. Además, se hace una serie de consideraciones sobre las ventajas e inconvenientes que presentaron los telescopios de refexión respecto a sus competidores de lentes convencionales, relatando la historia paralela de los dos tipos de instrumentos.

En cuanto al método de exposición, la historia del telescopio de reflexión se organiza en torno a la figura de Isaac Newton y se divide en tres partes diferenciadas. La primera se refiere a los antecedentes del telescopio anteriores a Newton, remontándose a los relatos de espejos "ustorios". La fascinación que sintieron los hombres del Barroco por los espejos deformantes, llevaron a los artesanos a perfeccionar la técnica de las superficies reflectoras, lo que permitió a Mersenne, Gregory y el mismo Newton a sustituir las lentes por espejos cóncavos. Después de Newton, el telescopio de reflexión se desarrolla gracias a una serie de científicos y técnicos, reseñados aquí.

La explicación de los diferentes tipos de telescopios se ilustran con dibujos en su mayoría tomados de las memorias y de los libros escritos por los inventores. Tanto las *Philosophical Transactions* de la *Royal Society* de Londres, como el *Journal des Savants* y las memorias de la *Académie des Sciences* de París, junto con otras instituciones científicas, publicaron y difundieron las invenciones y las noticias sobre los avances en la construcción de telescopios. En el libro se recogen varias portadas y dibujos de estas publicaciones, así como de los libros de óptica relacionados con el tema. El material gráfico se completa con piezas de museo y algunas instalaciones de telescopios más recientes.

La mayoría de las noticias se refieren a autores de telescopios y a instalaciones realizadas en Francia, Italia e Inglaterra, países que estuvieron a la cabeza en la investigación científica de instrumentos para observatorios astronómicos durante los siglos XVII al XIX. La mayor atención prestada a los instrumentos italianos se justifica porque los autores trabajaron principalmente con material del Observatorio Ximeniano de Florencia.

En el texto sólo hay una leve alusión a los espejos preincaicos descritos por Antonio de Ulloa. Sin embargo, hay una interesante contribución española al origen del telescopio en el siglo XVI debida a los hermanos Roget en Cataluña. (N. G. T.)

Indice anual

Este índice contiene los nombres de los autores y los títulos de los artículos aparecidos en Investigación y Ciencia *a partir de enero de 1994.*

AUTORES

TITULOS

TALLER Y LABORATORIO

JUEGOS MATEMATICOS Y DE ORDENADOR